

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

ESTUDO DAS PERDAS MAGNÉTICAS
INTERLAMINARES EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

EVANDRO JACOB MEURER

Florianópolis, Março de 2005.

ESTUDO DAS PERDAS MAGNÉTICAS INTERLAMINARES EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

Evandro Jacob Meurer

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr. - UFSC
Orientador

Prof. Denizar Cruz Martins, Dr. - UFSC
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr. - UFSC
Presidente

Prof. Renato Carlson, Dr. - UFSC
Co-Orientador

Eng. Luiz Von Dokonal, M.Sc. - EMBRACO

Prof. Nelson Sadowski, Dr. - UFSC

Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr. - UFSC

àqueles que farão uso desta dissertação.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi possível graças à cooperação de várias pessoas que de várias maneiras atuaram no processo dos estudos teóricos e experimentais, auxiliando no progresso desta contribuição científica. Desta maneira, agradeço:

Aos professores do GRUCAD, que ao dividir seus conhecimentos capacitaram um grupo de pesquisa para realizar estudos e experimentos na área de eletromagnetismo, e perpetuar o conhecimento e a experiência adquirida ao longo dos anos.

Ao meu orientador, Prof. Jhoe, que conduziu várias, longas e frutíferas conversas, transmitindo o conhecimento necessário para planejar, conduzir e analisar os estudos de maneira correta e inteligente, por auxiliar na elaboração dos ensaios, na análise de resultados e na correção desta dissertação.

Ao meu co-orientador, Prof. Carlson, por auxiliar na tomada de decisões.

Ao Finep e à Embraco, pela realização do projeto de pesquisa a qual este trabalho esteve vinculado, e ao CNPq pelo auxílio financeiro concedido.

À banca examinadora, pela avaliação e revisão dos conceitos e idéias apresentadas.

Aos colegas do GRUCAD, pela prontidão e dedicação em frutuosas discussões de muitos fenômenos e teorias levantadas em nossas rodas de conversa. Em especial aos colegas André, Charles, Claudinei, Stevan, Filomena, Maurício, Tiago e João por colaborar com as atividades relacionadas com esta dissertação, e que sem eles, o desenrolar dos trabalhos seria mais difícil.

Aos colegas do curso de engenharia, em especial ao Pedro, Geraldo, Fagner, José Flávio, Joabel, Geziel, Jefferson e Maccari que trilharam o caminho da pesquisa e/ou do mercado de trabalho, o muito obrigado pela parceria neste longo e importante período.

Aos servidores da UFSC, técnicos e administrativos, por toda infra-estrutura proporcionada, por auxiliar na obtenção de materiais e equipamentos para realização de ensaios.

À minha namorada Daniela, que teve paciência, e manteve meu espírito alegre e entusiasmado, acompanhando meus passos e comemorando comigo cada progresso.

À minha família, meu pai Egon, minha mãe Edi e meu irmão Eduardo, por todo suporte prestado nestes seis longos anos longe de casa para concluir os estudos de engenharia.

À todos que, de uma forma ou de outra, colaboraram para a realização desta dissertação.

RESUMO DA DISSERTAÇÃO APRESENTADA À UFSC COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

**ESTUDO DAS PERDAS MAGNÉTICAS
INTERLAMINARES EM MÁQUINAS ELETRICAS**

Evandro Jacob Meurer

Março / 2005

Orientador: Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Co-orientador: Renato Carlson, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos.

Palavras-chave: Perdas magnéticas interlaminares, revestimentos de lâminas de aço para fins elétricos, modelagem de caminhos alternativos para correntes induzidas, análise de laços BH

Número de Páginas: 114

RESUMO: O presente trabalho aborda o assunto das perdas magnéticas que ocorrem por ocasião de contatos elétricos entre lâminas de um núcleo magnético, denominada de perda magnética interlaminar. Foram estudados possíveis fatores que causam a formação deste tipo de perdas, como rebarbas, parafusos de fixação, falhas no revestimento das lâminas, e o que possa proporcionar contatos elétricos entre as lâminas. É realizado um estudo de estatores montados com lâminas com e sem revestimento e acrescentando isolante entre as lâminas. Um procedimento de avaliação e determinação de perdas interlaminares em estatores montados é proposto, de forma que cada fator causador das perdas interlaminares possa ser estudado separadamente, identificando sua contribuição no fenômeno. A influência de caminhos alternativos para correntes induzidas em pacotes montados é abordada de forma experimental por meio de protótipos, e de forma matemática através de um modelo numérico.

**ABSTRACT OF DISSERTATION PRESENTED TO UFSC AS A
PARTIAL FULFILLMENT OF THE**

Requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

**STUDY OF INTERLAMINAR MAGNETIC LOSSES IN
ELECTRICAL ENGINES**

Evandro Jacob Meurer

March / 2005

Advisor: Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Co-Advisor: Renato Carlson, Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic machines

Keywords: Interlaminar magnetic losses, coatings of electric steel sheets, modeling of alternative ways for eddy currents, analysis of locus BH

Number of Pages: 114

ABSTRACT: The present work explore the magnetic loss by electric contacts between sheets in a magnetic core, which is called interlaminar magnetic loss. The possible factors which can generate these losses had been studied, as burrs, screws, imperfections coating, and everything that can provide electric contacts between the sheets. A study in stators mounted with and without coating in the sheets is carried through, as well as with isolating between the sheets. A procedure for interlaminar losses evaluation in mounted stators is proposed, each interlaminar loss factor can be studied separately, identifying its contribution in the phenomenon. The influence of alternative ways for eddy currents inside the core is experimentally obtained from a prototype, and mathematically through a numerical model.

Sumário

Sumário	vii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos do trabalho e metodologia de pesquisa	2
1.2 As equações de Maxwell	3
1.3 As perdas magnéticas no ferro	4
1.3.1 Perdas por Histerese	5
1.3.2 Perdas Dinâmicas	7
1.3.3 Perdas totais e métodos de separação	10
2 Noções dos processos metalúrgicos do aço: tratamento térmico e estampagem	12
2.1 Fatores que afetam as propriedades magnéticas	12
2.2 Tratamento térmico	13
2.2.1 Inconvenientes do tratamento térmico	14
2.3 O processo de estampagem	16
2.4 Efeitos de estampagem nas propriedades magnéticas da lâmina	19
2.4.1 Mensuração do efeito do corte a laser nas lâminas de aço ao silício	22
2.5 Efeito de rebarbas em estatores	25
2.6 Considerações finais	27
3 Estudo da isolamento interlaminar em estatores	29
3.1 Tipos de revestimento de lâminas	29
3.2 Testes para medição da capacidade de isolamento entre lâminas	31
3.3 Análise do desempenho magnético de estatores	33
3.4 Estudo de estatores com diferentes tipos de isolações entre lâminas	36
3.4.1 Descrição e nomenclatura dos tipos de estatores e suas isolações	36
3.4.2 Verificação da suficiência da quantidade de amostras	37
3.4.3 Medidas do efeito das isolações nos quatro tipos de estatores	39
3.4.4 Análise da perda por histerese nos estatores do grupo N e L	43
3.5 Considerações finais	45
4 Método para avaliação das perdas interlaminares	46
4.1 Metodologia proposta para determinação das perdas interlaminares	47
4.2 Influência dos parafusos de fixação em núcleos laminados	49
4.3 Influência da pressão de fixação das lâminas nos núcleos	52
4.4 Medição e análise das perdas interlaminares	55
4.4.1 Grupo N	55
4.4.2 Grupo L	56
4.4.3 Medições em baixa frequência para averiguação do método	58
4.4.4 Variação de frequência e indução	59
4.4.5 Comparação entre alguns estatores	62
4.5 Considerações finais	63

5	<i>Análise do efeito das rebarbas no desempenho magnético</i>	65
5.1	Abordagem baseada em simulação numérica utilizando o MEF	66
5.2	Análise de laços BH sob efeito de anéis de curto-circuito	69
5.2.1	Estudo dos efeitos dos anéis de curto circuito na situação sem transferência de potencia	69
5.2.2	Estudo dos efeitos dos anéis de curto-circuito na situação com transferência de potência	75
5.3	Análise dos laços BH dos estatores do grupo N e L	76
5.4	Considerações finais	79
6	<i>Modelagem numérica para estudo dos efeitos de caminhos alternativos para correntes induzidas em núcleos de motores</i>	81
6.1	Quadro protótipo 105	86
6.1.1	Construção do protótipo	86
6.2	Simulação utilizando o modelo de permeabilidade fixa.	87
6.3	Simulação utilizando a curva de magnetização inicial	88
6.4	Resultados utilizando os parâmetros de Jiles-Atherton inverso (considerando o efeito da histerese)	89
6.5	Quadro protótipo 094	93
6.6	Considerações finais	97
7	<i>Conclusão</i>	99
Anexo A		105
A.1	Equipamentos utilizados	105
A.2	Bancada MPG100D Brockhaus	105
A.3	Bancada de caracterização desenvolvida pelo GRUCAD	108
A.4	Análise da bobina de compensação do fluxo disperso do quadro de Epstein	109
Anexo B		111
Referências Bibliográficas		112

1 Introdução

A descoberta da eletricidade foi um grande marco para o desenvolvimento da humanidade, do ponto de vista tecnológico, e trouxe várias modificações na rotina diária das pessoas: lâmpadas, rádios, televisores, eletrodomésticos, assim por diante. E dentre os equipamentos elétricos, encontram-se os mais diversos tipos de máquinas elétricas, desde transformadores e motores de indução de vários MW até os pequenos motores utilizados em brinquedos movidos à bateria. Nesta quantidade enorme de aplicações, pode-se imaginar a quantidade de energia elétrica consumida pelas máquinas elétricas, as quais encontram-se principalmente no setor industrial. Segundo relatórios do Ministério de Minas e Energia, em 2002 o setor industrial consumiu aproximadamente 43% da eletricidade produzida no Brasil, ou seja, 148 594 GWh dos 344 644 GWh produzidos. Enquanto isso, o setor residencial consumiu apenas 21% da eletricidade produzida, ou seja 72 740 GWh.

Desde o desenvolvimento comercial dos motores e transformadores no início do século XX, várias teorias e modelos foram desenvolvidos a fim de explicar os fenômenos ali encontrados, tanto do ponto de vista dos materiais empregados como dos fenômenos eletromagnéticos. Por volta da década de 50 do século passado, a comunidade científica não demonstrava tanto interesse pela modelagem dos materiais magnéticos como passou a apresentar a partir da década de 80. Além das crises energéticas que começaram nos anos 70, quando aumentou a preocupação com o rendimento das máquinas elétricas, um dos fatores que contribuiu para uma retomada do estudo dos materiais magnéticos foi o desenvolvimento da eletrônica de potência. A alimentação de máquinas elétricas por formas de onda não senoidais, como por exemplo, a PWM (Pulse Width Modulation), e o aparecimento de harmônicos, gerou uma necessidade de melhoria e aperfeiçoamento dos conceitos, teorias e modelos existentes.

Recentemente, o Brasil passou por uma grande crise energética, e novamente o interesse em melhorar o rendimento das máquinas ganhou espaço para discussão.

A preocupação em conservação de energia, leis governamentais e de comércio, e a concorrência entre empresas, as quais procuram melhorar o rendimento de seus aparelhos e diminuir custos, estão proporcionando uma aproximação maior entre o setor industrial e o setor de pesquisa nesta área. Um exemplo desta realidade é este trabalho, fruto de

parceiras, sendo financiado em parte pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), pela Embraco (Empresa Brasileira de Compressores), CNPq e pelo GRUCAD (Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina).

1.1 Objetivos do trabalho e metodologia de pesquisa

As perdas magnéticas do núcleo das máquinas, também chamadas de perdas em vazio ou perdas de magnetização compreendem as perdas no ferro e perdas no cobre (enrolamentos) devido à corrente de magnetização e são dissipadas na forma de calor. Vários fatores são responsáveis pela dissipação de energia no ferro, como por exemplo, a energia de alinhamento dos domínios magnéticos, a energia gerada por efeito Joule nas lâminas provocada pelas correntes induzidas, a falha ou baixa isolamento entre lâminas aumentando correntes induzidas no núcleo e as rebarbas. As rebarbas podem proporcionar caminhos alternativos facilitando a formação de correntes induzidas.

Fatores construtivos podem aumentar ou diminuir a eficiência magnética do núcleo. Convém antecipar que alguns destes fatores se constituem em detalhes difíceis de serem controlados e/ou separados da interação entre os mesmos. Os fatores que serão abordados neste trabalho são aqueles que acarretam perdas de energia classificadas como perdas interlaminares, ou que estejam envolvidos diretamente na abordagem das mesmas. Assim, busca-se nesta pesquisa entender as razões e os fenômenos causadores desta classe de perda nos núcleos. Como resultado do estudo, pretende-se fornecer subsídios para a continuação de pesquisas no assunto e, se possível, que estes resultados sejam aplicados na melhoria da construção de núcleos laminados de máquinas elétricas.

O desenvolvimento da pesquisa apresentada ao longo do texto será acompanhado de estudos de outros autores, com verificações práticas realizadas durante este trabalho, utilizando materiais e equipamentos disponíveis no GRUCAD e fornecidos pela Embraco e Acesita (Cia Aços Especiais Itabira).

Serão abordados os seguintes fatores relacionados com as perdas interlaminares: a) as perdas interlaminares em si causadas pelo acréscimo de correntes induzidas, b) o efeito da pressão mecânica no pacote das lâminas, c) as rebarbas, d) os parafusos de fixação das lâminas no pacote, e) caminhos alternativos para correntes induzidas com desvio do fluxo

magnético, f) modelagem matemática e comparação experimental dos fenômenos dos caminhos alternativos das correntes induzidas com desvio do fluxo magnético.

1.2 As equações de Maxwell

As equações de Maxwell [1] descrevem matematicamente os fenômenos envolvidos, embora como diz J. P. A. Bastos em seu livro “Eletromagnetismo e Cálculo de Campos”, “Em outras palavras, a abrangência das equações de Maxwell é muito grande e é interessante ressaltar que, em conhecendo somente quatro equações e algumas relações complementares, temos em mãos uma ferramenta poderosa que possibilita a solução de inúmeros problemas. Cabe também salientar que os fenômenos físicos descritos pelas equações de Maxwell são, intrinsecamente, bastante simples, ou seja, as leis são de fácil compreensão. No entanto, as situações físicas envolvendo geometrias complexas e características de materiais podem gerar problemas reais de difícil solução.”.

Isto justifica a necessidade de programas numéricos de cálculo de campos, como por exemplo àqueles baseados no método por elementos finitos para abordagem dos dispositivos eletromagnéticos. As equações de Maxwell sob a forma local (1.1) a (1.4), associadas com as relações constitutivas (1.5) e (1.6), reúnem em si todas as grandezas eletromagnéticas definidas no tempo e no espaço de um sistema [1].

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\text{div} \vec{H} = 0 \quad (1.2)$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.3)$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (1.4)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (1.5)$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (1.6)$$

Onde \vec{H} é o vetor campo magnético, \vec{J} é o vetor densidade de corrente, \vec{D} é o vetor indução elétrica, \vec{E} é o vetor campo elétrico, \vec{B} é o vetor indução magnética, ρ é a densidade volumétrica de carga, μ a permeabilidade magnética do material e σ a condutividade elétrica do material.

1.3 As perdas magnéticas no ferro

O campo magnético variável no tempo ao atravessar um meio magnético possui perdas associadas à histerese e às correntes induzidas (se o material for condutor). As máquinas elétricas compostas por núcleos magnéticos, como por exemplo os motores, geradores e transformadores, possuem perdas energéticas as quais diminuem seu rendimento. Há um somatório de perdas nestas máquinas, entre elas as perdas por ventilação, por atrito, por ruído, nos enrolamentos e assim por diante. Neste trabalho, abordam-se as perdas magnéticas no ferro sob o enfoque da engenharia elétrica. Um dos modelos das perdas magnéticas no material magnético é sua separação em três componentes [1, 2, 3], perdas por histerese, perdas por correntes induzidas ou correntes de Foucault, e perdas anômalas ou por excesso. A fim de atenuar as correntes induzidas no núcleo, o aço para fins elétricos é utilizado de forma laminada nas estruturas submetidas a campos regularmente variáveis no tempo.

As perdas magnéticas em lâminas de aço ao silício podem ser medidas de várias formas, sendo algumas delas padronizadas por normas [4, 5, 6]. Dentre os aparelhos utilizados na caracterização, tem-se o quadro de Epstein, o *Single Strip Tester* (SST) e os métodos utilizando transformadores de núcleo toroidal [5]. No quadro de Epstein, as lâminas são inseridas para formar um circuito magnético fechado de quatro braços, no formato de um quadrado, sendo exigido um mínimo de 12 lâminas (3 por braço) [6]. O SST consiste em um equipamento onde é introduzida apenas uma lâmina de material. O circuito magnético é fechado por um núcleo interno ao aparelho [5, 7]. No teste de dispositivos com núcleos na forma de toróides, as amostras previamente preparadas são envolvidas por enrolamentos homogêneos em toda sua circunferência [8]. O teste padronizado com o quadro de Epstein é o mais empregado. Maiores detalhes dos equipamentos utilizados para as medições empregadas neste trabalho são descritos no anexo A.

A indução média no material magnético é obtida através de (1.7) e o campo magnético no material é calculado por meio de (1.8). Estas equações dependem do aspecto físico do núcleo a ser ensaiado, isto é da seção magnética efetiva S e do caminho magnético médio l_m , bem como do número de espiras dos enrolamentos primário e secundário (respectivamente N_P e N_S).

$$B(t) = \frac{1}{N_s \cdot S} \int v_s(t) dt \quad [\text{T}] \quad (1.7)$$

$$H(t) = \frac{N_p}{l_m} \cdot i_p(t) \quad [\text{A/m}] \quad (1.8)$$

Com os valores de Indução em Tesla [T] e Campo Magnético em ampères/metro [A/m], é possível calcular o valor das perdas totais magnéticas do dispositivo através da equação (1.9), onde m_v é a densidade específica do material em kg/m^3 . Para fins industriais, utiliza-se freqüentemente a unidade de perda em W/kg, bastando então multiplicar este valor pela freqüência de teste (equação (1.10)).

$$W_t = \int_0^B H \cdot dB \quad [\text{J/m}^3] \quad \text{ou} \quad W_t = \frac{l}{m_v} \int_0^B H \cdot dB \quad [\text{J/kg}] \quad (1.9)$$

$$P_t = W_t \cdot f \quad [\text{W/kg}] \quad (1.10)$$

1.3.1 Perdas por Histerese

A perda por histerese está relacionada com a energia necessária para deslocar as paredes dos domínios magnéticos. Em freqüências em que o efeito pelicular de distribuição da indução em lâminas é desprezível (para lâminas de 0,5mm de espessura e até aproximadamente 400 Hz) ou seja, quando o fluxo magnético no interior do material é homogêneo, as perdas por histerese não dependem da freqüência de excitação. Podem ser medidas em uma freqüência próxima a zero, em um regime quase estático, em torno de 1Hz ou menos. Esta técnica parece ser a mais indicada, já que se está medindo o valor das perdas em uma freqüência tão baixa que as componentes dinâmicas podem ser desprezadas. A grande dificuldade deste método é o controle da forma senoidal nesta baixa freqüência, exigindo equipamentos especiais.

Sob o aspecto metalúrgico, as perdas por histerese são função do volume, tamanho, distribuição das impurezas, orientação dos cristais, níveis de estresse do material e de outras características micro-estruturais do material. Steinmetz propôs um modelo (equação (1.11)) até hoje utilizado, e seus parâmetros são obtidos por meio de ensaios. A Fig. 1.1 apresenta uma medida realizada em um material e aplicação do modelo de Steinmetz. Percebe-se que o modelo é satisfatório em uma faixa de indução. Nesta amostra, para valores acima de 1,3 T, o modelo não acompanha a evolução das perdas magnéticas

medidas. Para a representação da perda magnética na região de não saturação, o modelo de Steinmetz proporciona resultados muito próximos.

$$W_h = k_h \cdot B^\alpha \quad (1.11)$$

Geralmente, o gráfico BH (ou lócus B(H)) de um material é erroneamente denominado como gráfico de histerese do material. A Fig. 1.2 apresenta duas formas de onda no lócus B(H) em duas frequências distintas. Pode-se chamar gráfico de histerese a forma obtida à frequência de 1Hz para o aço ao silício, pois corresponde aproximadamente à perda por histerese, não apresentando os efeitos significativos das perdas dinâmicas. Já a curva BH à 50 Hz representa, além das perdas por histerese, as perdas dinâmicas também.

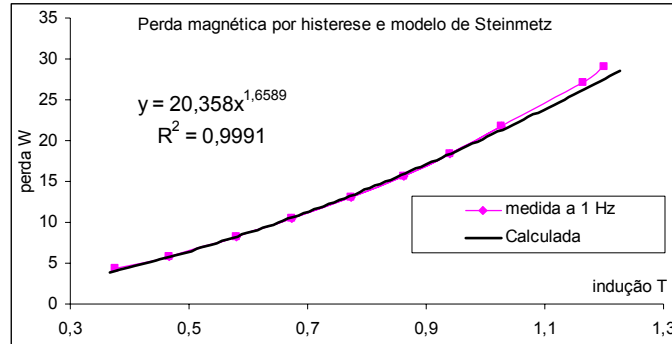


Fig. 1.1 – Medição das perdas e modelo de Steinmetz.

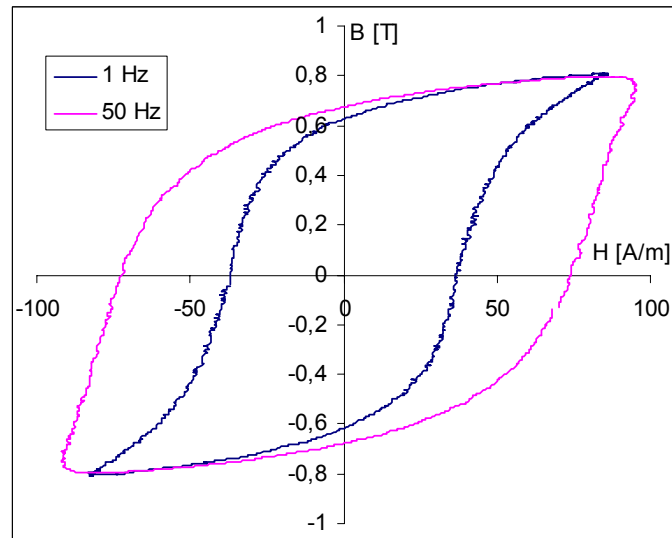


Fig. 1.2 – Laços BH medidos a 1Hz e 50 Hz

1.3.2 Perdas Dinâmicas

Além das perdas por histerese, o material apresenta perdas que variam com a frequência da forma de onda do fluxo, incluindo o efeito das harmônicas. Estas perdas, denominadas perdas por correntes de Foucault, são geradas através das correntes induzidas no núcleo ferromagnético quando este é percorrido por um fluxo variável no tempo. A variação do fluxo produz um campo elétrico ao longo de um caminho fechado (Lei de Faraday, equação (1.12)) e, como este “caminho” possui uma condutividade elétrica associada, formam-se anéis de corrente (através da relação de passagem, equação (1.13)). Ao analisar uma lâmina de aço, sendo seu fluxo paralelo a sua direção, haverá a formação de anéis de corrente num plano perpendicular ao do fluxo. Ao tornar a lâmina mais fina, achatam-se estes anéis de correntes induzidas, dificultando sua formação. Também é possível a inserção de silício (também alumínio ou outras substâncias) ao aço para a diminuição da condutividade da lâmina e, conseqüentemente, diminuir a densidade de corrente (equação (1.13)). Para a formulação matemática de um modelo para este tipo de perda, considera-se apenas a indução magnética B na direção z (vide Fig. 1.3). Como a largura da lâmina é maior que a espessura ($y \gg x$), considera-se apenas a componente y da corrente (conseqüentemente do campo elétrico também), que será constante para qualquer valor de y . Assim, pode-se escrever através de (1.14) os vetores campo elétrico e indução de acordo com o desenho da Fig. 1.3.

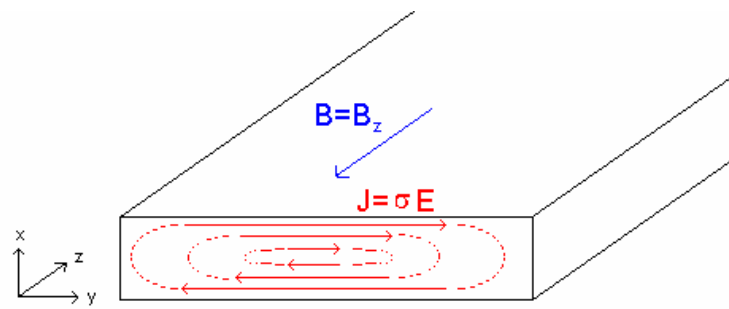


Fig. 1.3 – Distribuição das correntes induzidas na lâmina

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (1.12)$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (1.13)$$

$$\vec{E} = (0, E(t), 0) \quad \text{e} \quad \vec{B} = (0, 0, B(t)) \quad (1.14)$$

Resolvendo o determinante do lado esquerdo da equação (1.12), chega-se à equação diferencial cuja solução é dada em (1.15). O valor de C é uma constante e é determinada pela condição de contorno. Como não existe descontinuidade do campo elétrico nem da densidade de corrente, é necessário ter $E=0$ para $x=0$ no centro da lâmina. Portanto C é igual a “0”.

$$E(x, t) = -\frac{dB(t)}{dt} \cdot x + C \quad (1.15)$$

A potência dissipada pela lâmina por efeito Joule é expressa pela equação (1.16), sendo σ o valor da condutividade elétrica do material.

$$P_f = \iiint_v \sigma [E(t)]^2 \partial v \quad (1.16)$$

Adotando as dimensões l_x , l_y e l_z da lâmina sendo $l_x = d$ (espessura da lâmina) e substituindo (1.15) em (1.16), tem-se em (1.17) integral no volume da potência dissipada por efeito Joule no material, cujo resultado é dado em (1.18).

$$P_f = \sigma \int_0^{l_z} \int_0^{l_y} \int_0^{d/2} \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2 \cdot x^2 \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (1.17)$$

$$P_f = \sigma \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2 \cdot l_y \cdot l_z \cdot \frac{d^3}{12} \quad [\text{W}] \quad (1.18)$$

Dividindo a equação (1.18) pelo volume da lâmina (equação (1.19)), se obtém a perda instantânea específica do material. Para se determinar a perda média do material, calcula-se a média em um período T . Desta maneira, a equação (1.20) apresenta a perda média em função do volume do material. Nesta dissertação, será comum encontrar os valores de perda expressos em função da massa da amostra. Expressa-se então a perda média na unidade de W/kg.

$$Vol = d \cdot l_y \cdot l_z \quad [\text{m}^3] \quad (1.19)$$

$$\frac{P_f}{Vol} = \frac{\sigma \cdot d^2}{12} \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2 \partial t \quad [\text{W/m}^3] \quad (1.20)$$

$$P_f = \frac{\sigma \cdot d^2}{12 \cdot m_v} \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2 dt \quad [\text{W/kg}] \quad (1.21)$$

O estudo se limitará a uma indução senoidal pura (desconsideram-se aqui as harmônicas e os acionamentos de máquinas realizados por alimentação contendo uma modulação PWM). Então, particulariza-se a equação (1.21) ao caso senoidal, substituindo $B(t)$ por $B \cdot \sin(\omega t)$, conforme desenvolvimento matemático a seguir.

$$P_f = \frac{\sigma \cdot d^2}{12 \cdot m_v} \frac{1}{T} \left[\int_0^T B^2 (\omega \cdot \cos(\omega t))^2 dt \right] \quad (1.22)$$

$$P_f = \frac{\sigma \cdot d^2}{12 \cdot m_v} \frac{1}{T} \omega^2 \cdot B^2 \left[\frac{1}{2} \int_0^T (1 + \cos(2\omega t)) dt \right] \quad (1.23)$$

$$P_f = \frac{\sigma \cdot d^2}{12 \cdot m_v} \frac{1}{T} \omega^2 \cdot B^2 \left[\frac{1}{2} (T + 0) \right] \quad (1.24)$$

$$P_f = \frac{\sigma \cdot (\pi \cdot d)^2}{6 \cdot m_v} B^2 \cdot f^2 \quad [\text{W/kg}] \quad (1.25)$$

Finalmente a equação (1.25) apresenta a forma final da perda por correntes de Foucault (perdas dinâmicas clássicas calculadas a partir da condutividade elétrica σ e da espessura da lâmina d) para uma indução senoidal pura. Existem formas de acrescentar fatores de correção para que esta equação contemple também os pontos de operação não senoidais [9], mas esta não será abordada neste estudo. Dividindo a equação (1.25) pela frequência de operação, tem-se a energia [J/kg] dissipada pelas correntes de Foucault, representada pela equação (1.26). Note que agora a energia dissipada por efeito Joule (ou pelas correntes induzidas) no núcleo ferromagnético é linear de acordo com a frequência. A Fig. 1.4 apresenta em vermelho a parcela representada por esta equação. Outro fato interessante é que para frequência nula, tal parcela não existe. O método de medição das perdas de histerese em uma frequência próxima de zero baseia-se neste fato.

$$W_f = \frac{\sigma \cdot (\pi \cdot d)^2}{6 \cdot m_v} B^2 \cdot f \quad [\text{J/kg}] \quad (1.26)$$

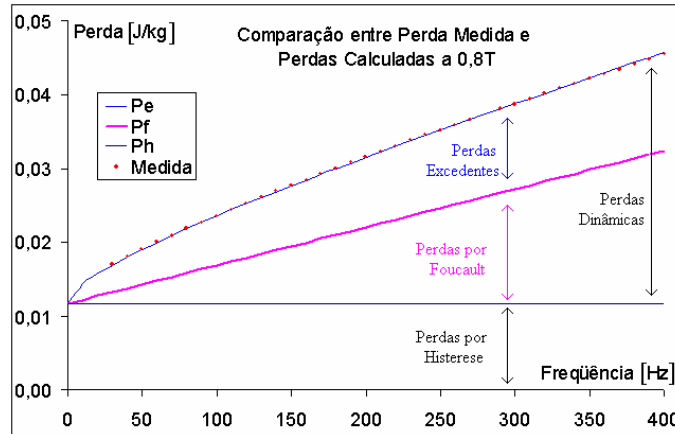


Fig. 1.4 - Representação das perdas magnéticas em função da frequência.

Com este modelo e o de Steinmetz para a perda por histerese, experiências práticas mostraram que os valores estimados até então não estavam representando bem as medições realizadas. Foi então introduzido o conceito de perdas anômalas [10, 11]. Bertotti na década de 80 estudou este fenômeno e o denominou de “perdas excedentes”, formalizada por intermédio de entidades chamadas objetos magnéticos (OM) [12, 13]. Ela depende de coeficientes de difícil mensuração prática, tais como tamanho de grão, condutividade elétrica, campo coercitivo e coeficientes empíricos, entre outros. A equação (1.27) apresenta o modelo matemático das perdas excedentes, onde G é o coeficiente de atrito dos OMs, V_o equivale a um campo coercitivo e caracteriza a oposição dos OMs a se ativar. O objetivo deste trabalho não é a exploração do conceito das perdas excedentes. Da equação (1.27), a qual modela as perdas excedentes, pode-se reunir todos os parâmetros em um único coeficiente k_e , conforme a equação (1.28), para uma forma de onda de fluxo senoidal.

$$We = \left[\frac{8,76363}{m_v} \sqrt{\sigma \cdot G \cdot V_o \cdot S} \right] \sqrt{f} \cdot B^{1.5} \quad [\text{J/kg}] \quad (1.27)$$

$$We = k_e \cdot \sqrt{f} \cdot B^{1.5} \quad [\text{J/kg}] \quad (1.28)$$

1.3.3 Perdas totais e métodos de separação

Para medir cada uma das três componentes de perdas magnéticas, devem-se realizar ensaios específicos que possibilitem separar numericamente cada uma das parcelas. A única parcela das três que pode ser medida diretamente é a perda por histerese, considerando que em uma frequência relativamente baixa as perdas dinâmicas possam ser desprezadas [14].

Para contornar a dificuldade prática de medir perdas em uma frequência muito baixa, onde são necessários equipamentos especiais, é possível realizar a separação das componentes de perdas realizando um ensaio em frequências diferentes (a norma NBR 5161 indica as frequências de 50Hz e 60Hz). Extrapolando esta curva para um valor de $f=0$, o valor extrapolado corresponderá à perda por histerese. Esta técnica é menos precisa que a anterior, e pode ser visto na Fig. 1.4 que nem sempre a extrapolação oferecerá um bom resultado, pois a tendência da perda total não é linear.

Os modelos de perdas no ferro apresentados podem ser reunidos em uma única equação simplificada [1, 3]. Esta equação pressupõe que os três tipos de perdas não interagem entre si, sendo um sistema linear e que se pode aplicar o princípio da superposição dos efeitos. A equação (1.29) [9, 14] representa matematicamente as perdas magnéticas totais para qualquer amplitude de indução B e qualquer frequência f . O valor de f_i representa a frequência em que foi realizado a medida da perda total, ou seja, para qual valor de f as constantes k_f e k_e foram calculadas.

$$W_t = k_h \cdot B^\alpha + \frac{f}{f_i} \cdot k_f \cdot B^2 + \sqrt{\frac{f}{f_i}} \cdot k_e \cdot B^{1.5} \text{ [J/kg]} \quad (1.29)$$

A Fig. 1.4 representa a composição dos tipos de perda magnética em função da frequência, perdas por histerese, por correntes de Foucault e excedentes. Nota-se que, se as perdas forem expressas na unidade de Joules (J/kg ou J/m³), a perda por histerese é constante e a perda por correntes de Foucault é linear em função da frequência.

O assunto acerca da separação das perdas ainda é motivo de pesquisa. Existem várias metodologias para realizar a separação das perdas magnéticas em suas componentes. F. Mendes [6] apresenta um método de separação que elimina o ensaio quase-estático. Este método foi desenvolvido para ser aplicado quando as medições são realizadas em equipamentos que não atingem a operação neste regime quase-estático. Através de dois ensaios, um variando a indução com frequência fixa e outro variando a frequência com a indução fixa, e aplicando os valores medidos na equação (1.29), um sistema não linear é construído. Aplicando um método numérico, a solução do sistema é o encontro dos coeficientes k_h , k_f e k_e , e do expoente α . Este método servirá como uma das ferramentas utilizadas neste presente trabalho.

2 Noções dos processos metalúrgicos do aço: tratamento térmico e estampagem

2.1 Fatores que afetam as propriedades magnéticas

O princípio de funcionamento de alguns motores elétricos baseia-se no fluxo magnético variável no tempo e espaço (senoidal), de forma a produzir uma força no entreferro, fazendo o rotor girar com torque definido. Como visto no capítulo anterior, a passagem deste fluxo magnético em um meio condutor (as lâminas de aço) produz correntes induzidas indesejáveis, as quais provocam perdas energéticas no equipamento. Através da análise das equações das perdas do primeiro capítulo, verifica-se que existem várias formas de reduzir as perdas magnéticas dos equipamentos. Podem-se diminuir tanto as perdas por histerese como as perdas dinâmicas.

A minimização da perda por histerese comporta a ciência dos materiais e a metalurgia, e não será explorada aqui. Porém existem processos na produção das máquinas elétricas que influenciam estas perdas, como a estampagem das lâminas, o tratamento térmico, a pressão exercida nas lâminas entre outros.

Quanto às perdas dinâmicas, pode-se reduzi-las diminuindo a espessura da lâmina, ou aumentando sua resistência elétrica através da incorporação de silício ao aço. Uma vez otimizados todos estes fatores, resta apenas melhorar os detalhes construtivos das máquinas elétricas. Outros fatores também podem influenciar as perdas dinâmicas, tais como as rebarbas devidas à estampagem das chapas, o revestimento das lâminas e os parafusos de fixação.

Assim, vários fatores influenciam o desempenho magnético e energético do motor, alguns somente na parcela por histerese, outros na parcela dinâmica, ou em ambos. Alguns detalhes construtivos serão estudados ao longo desta dissertação, isolando o efeito provocado por cada um deles nas propriedades magnéticas das lâminas. Neste capítulo serão abordados os efeitos do tratamento térmico das lâminas e o processo de estampagem, ou seja, os principais processos correlacionados com as perdas por histerese. No capítulo seguinte, serão abordados os tipos de revestimentos das lâminas e seus efeitos nas propriedades do conjunto, enfatizando os fatores correlacionados com a perda dinâmica.

2.2 Tratamento térmico

O processo de fabricação do aço é composto por várias etapas, podendo ser uma delas o tratamento térmico. O aço que recebe este tratamento térmico em sua última etapa de produção é conhecido como aço totalmente processado, enquanto que o aço que não recebe este tratamento é denominado como aço semi processado. No caso específico de aços utilizados para fins elétricos, que é o caso deste trabalho, este tratamento térmico chama-se recozimento final. O recozimento dos aços semi processados é fundamental para a melhoria das propriedades magnéticas entre outras, sendo então realizado pelo fabricante das máquinas elétricas. O recozimento reduz as perdas magnéticas pela metade e aumenta a permeabilidade de 100 a 300 % [15], pois durante este processo ocorre:

- redução do teor de carbono, devido a atmosfera oxidante;
- alívio das tensões (introduzidas pelo corte);
- recristalização;
- crescimento de grão;
- formação da camada superficial dielétrica (azulamento ou revestimento C-0, e será vista no capítulo a seguir).

Os aços totalmente processados já receberam o tratamento térmico na fábrica, e o recozimento pelo consumidor final é opcional. Como as propriedades magnéticas do aço são afetadas por tensões mecânicas introduzidas durante a operação de corte e punção, recomenda-se um tratamento térmico para o alívio de tensões. O recozimento dos aços é realizado após o processo de estampagem, justamente para aliviar as tensões introduzidas pelo processo de corte.

Foi realizado um experimento em lâminas de aço ao silício semi-processadas, do tipo 1006, com e sem o tratamento térmico, onde foram medidas as perdas magnéticas, separando-as em perdas por histerese e perda dinâmica. Como o tratamento térmico apenas modifica a estrutura dos grãos magnéticos, somente a perda por histerese é modificada. A parcela das perdas dinâmicas permanece inalterada. Através da Fig. 2.1 percebe-se que a perda por histerese (Ph) sofre uma grande diminuição com o tratamento térmico, enquanto que a perda dinâmica (Pw) não sofre alterações significativas (as diferenças podem ser atribuídas a diferenças nos lotes do aço). Observa-se que o tratamento térmico reduziu as perdas por histerese em média de 77%. Na Fig. 2.2 pode-se

ver o laço BH de ambas as lâminas à 50 Hz. O tratamento térmico reduziu a área do laço (consequência da diminuição das perdas), diminuindo também o valor do campo $H_{\text{máx}}$ necessário para o material chegar na indução de 1,5T. O laço BH da lâmina não tratada apresenta uma perda magnética muito maior que a lâmina tratada, na ordem de 109%. O equipamento utilizado para a realização deste experimento foi o quadro de Epstein da bancada Brockhaus, descrita no anexo A. Utilizou-se o método de separação das perdas totais da própria bancada.

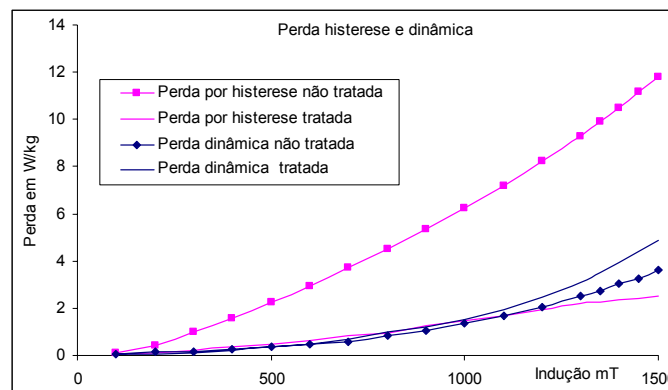


Fig. 2.1 – Perdas magnéticas por histerese e dinâmicas, em lâminas com e sem tratamento térmico

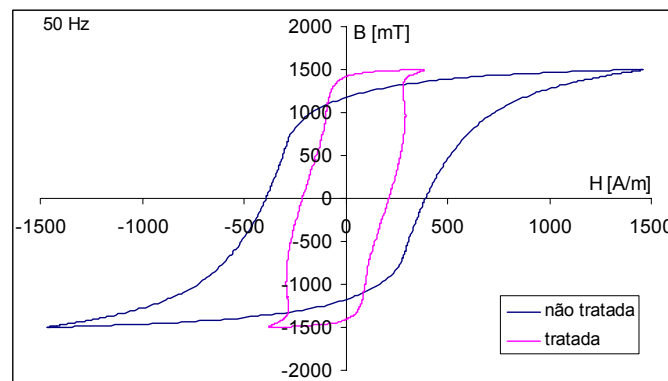


Fig. 2.2 – Laço BH das medidas realizadas em lâminas com e sem tratamento térmico à 50 Hz

2.2.1 Inconvenientes do tratamento térmico

Depois de serem estampadas, as lâminas podem ser montadas formando o pacote do estator, e este ser submetido ao tratamento térmico. Pode-se seguir o processo inverso, ou seja, primeiro aplicar o tratamento térmico e depois serem montadas para formarem o estator. No caso da primeira opção, durante o recozimento, pode acontecer o fenômeno “*stick together*” ou soldagem intralaminar, que ocorre quando duas lâminas grudam, formando um caminho para as correntes induzidas [16]. Uma atmosfera de tratamento

térmico mal controlada pode causar a soldagem entre as lâminas, criando micro-soldas interlaminares nos pontos de contato. Isso causa os indesejáveis curtos-circuitos facilitando as correntes induzidas e afetando o desempenho magnético da máquina. A prevenção dos fenômenos das microsoldagens é outro benefício da utilização do aço totalmente processado, tendo como consequência a melhora do desempenho magnético.

Para demonstrar o efeito do fenômeno “*stick together*”, Coombs [16] apresenta um experimento com estatores sem rebarbas recozidos em uma atmosfera de nitrogênio seco a 800°C. As lâminas utilizadas neste ensaio foram separadas em dois grupos, com e sem revestimento C-0 (o qual será abordado mais adiante). Foi permitido que ar entrasse em um momento apropriado para promover o fenômeno das microsoldagens. A Fig. 2.3 mostra os valores de perda magnética e de permeabilidade para conjuntos de até 10 lâminas grudadas.

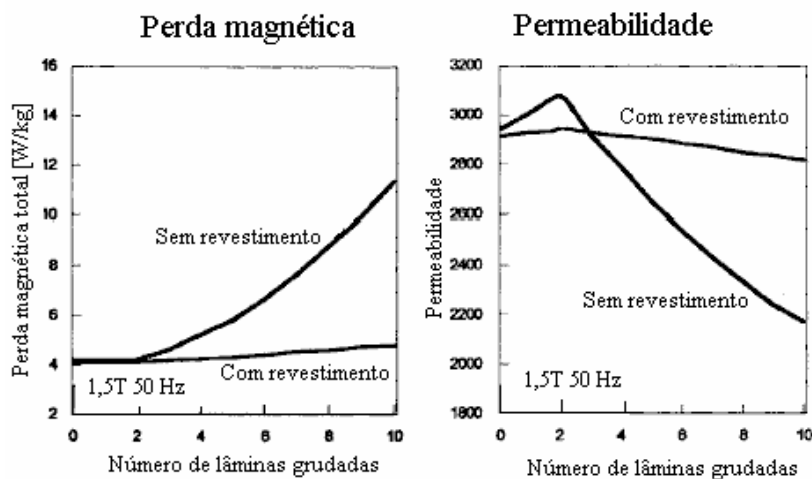


Fig. 2.3 – Efeito das micro-soldas interlaminares nas propriedades magnéticas de um estator [16]

Percebe-se que quanto mais lâminas juntas, que possuem micro-soldas entre si, maior é o valor das perdas no pacote e menor a permeabilidade do conjunto. Fica evidente nesta figura que a presença do revestimento na lâmina inibe a formação de micro-soldas que proporcionam caminhos alternativos para as correntes induzidas.

Outra comparação realizada foi com a adição de 3 pontos de solda na aresta da circunferência externa do estator. Esta estratégia fornece parte de um caminho sólido para as correntes induzidas, sendo a outra parte do caminho fornecido pelas micro-soldas entre as lâminas. Desta forma, pelos testes realizados, há uma interação entre os efeitos das

micro-soldas, dos caminhos provenientes dos pontos de solda e das lâminas serem ou não revestidas. Note na Fig. 2.4 que o revestimento não foi suficiente para manter as perdas constantes (no caso anterior, o revestimento foi suficiente para inibir a formação de caminhos de correntes induzidas, mantendo a perda praticamente constante mesmo com a presença das micro-soldas). Desta maneira, as soldas externas ao pacote proporcionaram um caminho para a formação de correntes induzidas. Este ensaio aponta que revestimentos pobres e com pontos de contato sólidos para fixar as lâminas no pacote possibilitam que as perdas em tal núcleo sejam relativamente elevadas. Mesmo se houver um bom revestimento, os contatos sólidos diminuem a ação do revestimento preexistente no material.

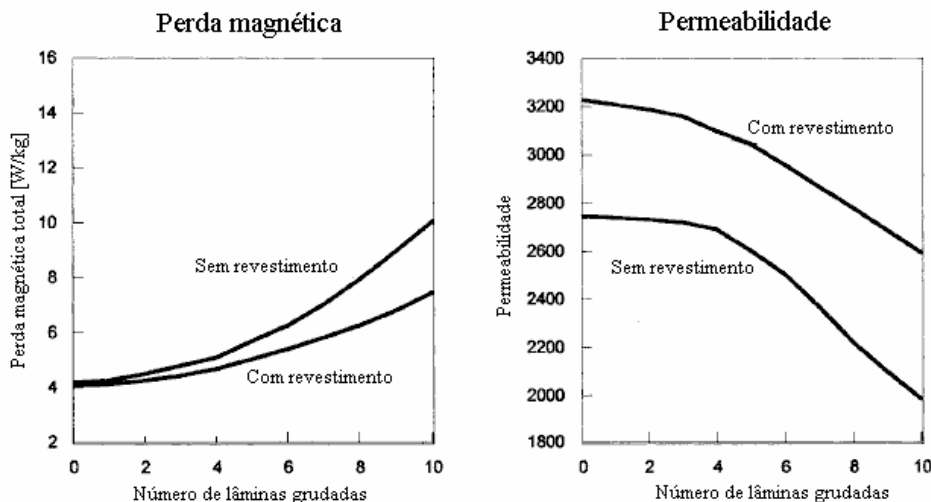


Fig. 2.4 – Efeito das micro-soldas interlaminares em um estator com soldas em 3 pontos das arestas externas [16]

2.3 O processo de estampagem

A utilização das lâminas de aço nas estruturas das máquinas elétricas é realizada recortando-as no perfil do circuito magnético desejado. Este processo é chamado de estampagem, onde grandes prensas cortam as chapas em lâminas pequenas e com o desenho desejado. Ao realizar este corte, as ferramentas deixam resíduos microscópicos nas laterais, que indicam que um objeto afiado efetuou um corte na lâmina. Estes resíduos são chamados de rebarbas, e têm alturas da ordem de alguns micrometros [17].

O processo de estampagem da lâmina é dividido em três etapas: deformação plástica, corte e ruptura. Filmagens de alta velocidade mostraram que quando o punção entra em

contato com o aço ocorre um empenamento da chapa seguido do escorregamento da mesma sobre as superfícies das ferramentas, desgastando as faces das ferramentas de corte [15]. O avanço da ferramenta resulta no corte inicial. Parte do material é forçada a entrar na cavidade, reduzindo a área que resiste ao esforço. Quando a tensão existente na área não cortada da chapa ultrapassa a tensão de ruptura ocorre a fratura do aço. A fratura do material se inicia na aresta da matriz, se ela estiver afiada. Se não, a fratura começa a alguma distância das arestas, resultando na formação de rebarba.

A Fig. 2.5 representa o processo de estampagem com as forças de tensão e compressão no material. A matriz possui uma conicidade (alívio) para facilitar a saída do material restante, e também uma folga (luz) entre a dimensão do punção e a cavidade da matriz (valor típico de 8% da espessura da lâmina por face).

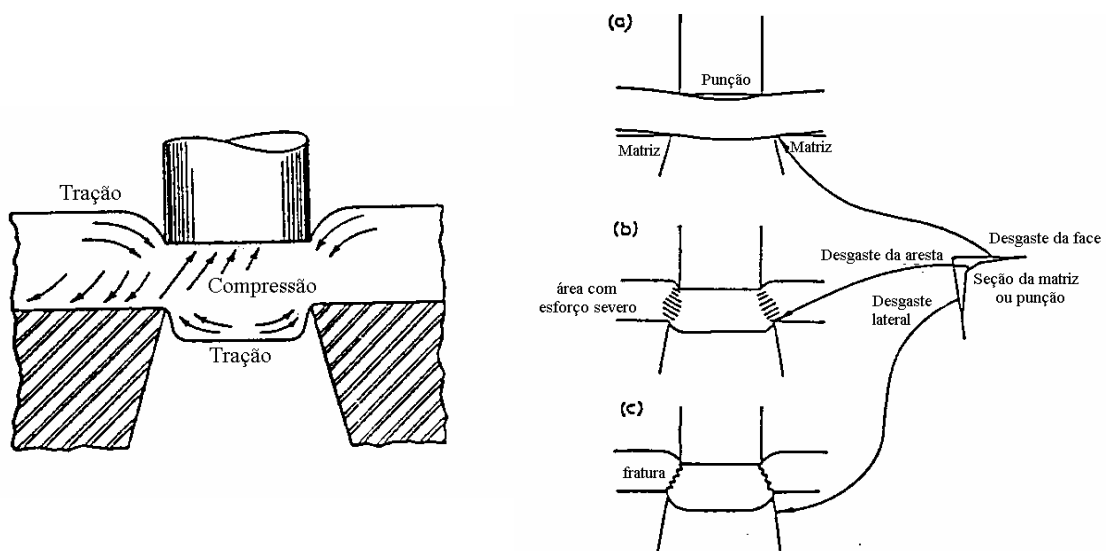


Fig. 2.5 - Representação do processo de estampagem [15]

A superfície lateral da lâmina cortada é normalmente decomposta em três regiões, como mostra a Fig. 2.6, denominadas (a) deformação, (b) corte e (c) fratura. A Fig. 2.7 mostra uma imagem obtida com o microscópio de varredura eletrônica (MEV) da face estampada, onde se pode perceber o processo de corte produzindo um desgaste liso e em seguida um processo de fratura, região onde o material é “cisalhado”. A mesma figura também mostra de outro perfil uma imagem metalográfica realizada com microscópio ótico onde podem ser vistos os grãos do material.

Este processo de estampagem do material deteriora a estrutura cristalina dos domínios magnéticos. Como os grãos (ou domínios magnéticos) têm uma distribuição

homogênea ao longo do material, a perda por histerese (movimentação das paredes dos domínios magnéticos) é homogênea no material. Com a estampagem, essa distribuição deixa de ser homogênea na região próxima ao corte, acarretando aumento da perda por histerese. Este assunto será melhor explorado na seção 2.4.

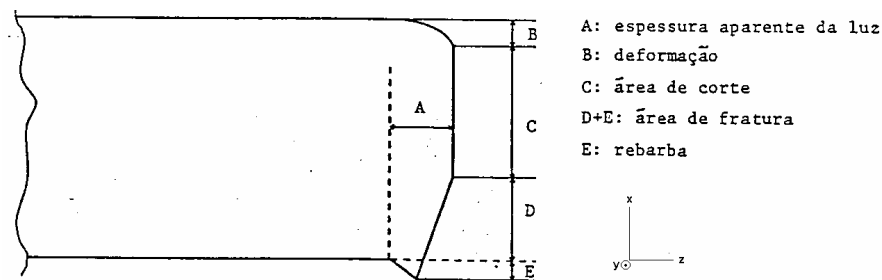


Fig. 2.6 – Principais zonas da superfície de corte de uma lâmina [15]

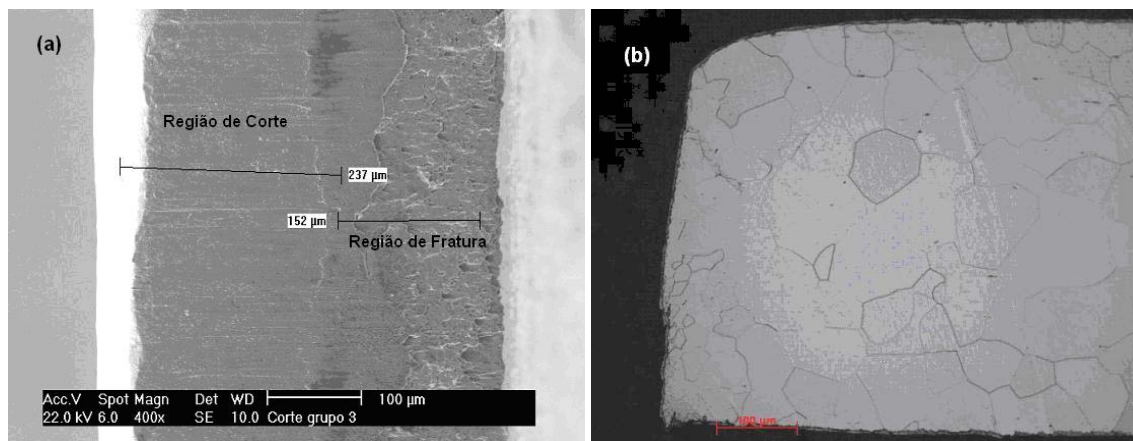


Fig. 2.7 – Estampagem realizada na lâmina (a) vista plano x-y, região de corte e fratura. (b) Perfil de estampagem do plano x-z e grãos do material magnético (Fotografia gentilmente cedida pela Embraco)

O desempenho do processo de estampagem pode ser melhorado utilizando um líquido lubrificante na ferramenta ou aplicando uma camada isolante com material orgânico nas lâminas a serem estampadas (conforme visto na seção sobre revestimentos).

Quando um nível do tamanho da rebarba atinge um valor máximo, as ferramentas utilizadas são removidas para serem afiadas ou trocadas. Estudos realizados por Coombs [16] mostram que tanto o revestimento quanto a redução de silício na composição do aço retardam a formação das rebarbas (veja Fig. 2.8).

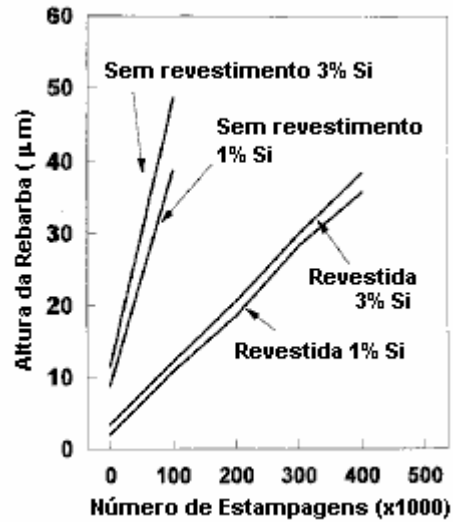


Fig. 2.8– Tamanho das rebarbas (µm) em função do numero de estampagens [16]

Outro trabalho realizado por Nakamura [18] apresenta o desenvolvimento de novos tipos de isolações. Na Fig. 2.9 ele compara o tamanho da rebarba produzida ao longo da vida útil da ferramenta de corte da estampagem utilizando aços com diversos revestimentos. Os revestimentos desenvolvidos por Nakamura (nomeados por L, L₂ e L₃ na Fig. 2.9) apresentam desempenho muito melhor do que os tradicionais C-3 (revestimento orgânico) e C-4 (revestimento inorgânico) que serão descritos no capítulo seguinte.

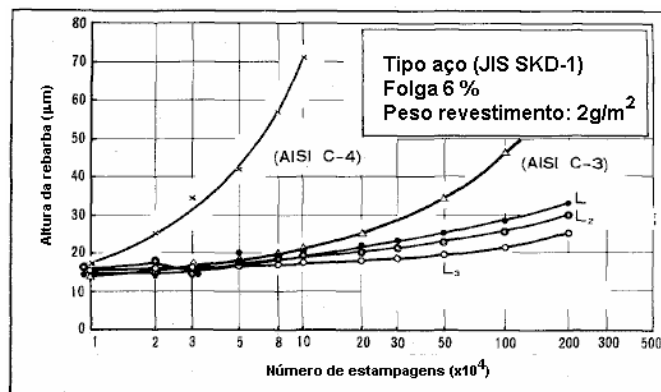


Fig. 2.9 – Comparação entre vários tipos de isolamento de lâminas [18]

2.4 Efeitos de estampagem nas propriedades magnéticas da lâmina

Como já visto, o processo de estampagem de lâminas cria tensões mecânicas na região do corte (ou seja, nas arestas estampadas). Estas tensões alteram a distribuição

homogênea da micro-estrutura do material, criando uma zona de “stress”. A mudança da micro-estrutura do material afeta diretamente suas propriedades, como a permeabilidade e as perdas magnéticas [17, 19, 20]. Para a verificação deste fenômeno, Smith [20] realizou um estudo que apresenta a variação das perdas em função da quantidade de arestas estampadas no material. A experiência foi realizada cortando-se as lâminas do quadro de Epstein em 1/2, 1/3 e 1/4 da largura da lâmina original, de modo a incluir na medição o efeito das arestas. Percebe-se pela Fig. 2.10 que, para o mesmo material ensaiado no quadro de Epstein, a inclusão de arestas estampadas aumentou o valor das perdas magnéticas em quase 10% por aresta.

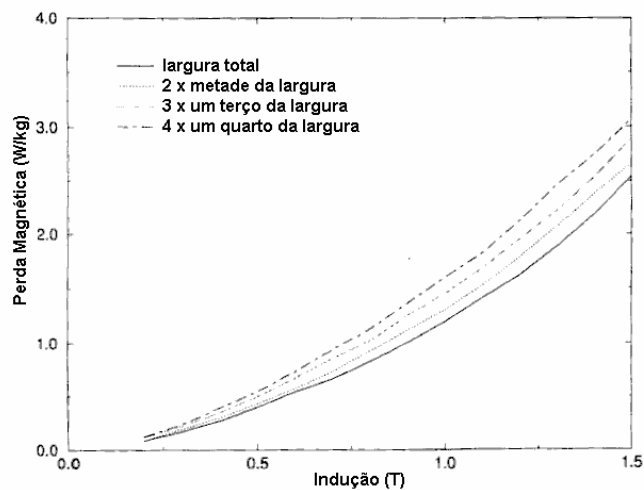


Fig. 2.10 - Perdas magnéticas em lâminas do quadro de Epstein com cortes de 1/2, 1/3 e 1/4 da largura original [20]

Outros autores também abordaram o assunto utilizando amostras toroidais para a realização dos experimentos. Boglietti [17, 19] realizou os experimentos acrescentando arestas estampadas nos toróides, dividindo o toróide inicial (120/200mm de diâmetros interno e externo) em 1/2, 1/3 e 1/4 da largura de laminação, criando vários anéis concêntricos. A Tabela 2.1 apresenta os valores de comprimento das arestas estampadas e largura dos anéis concêntricos que compõem o toróide.

O processo de estampagem incluiu deformações na micro-estrutura do material, afetando a perda por histerese. A perda dinâmica neste caso permanece quase inalterada [17]. As deformações mecânicas nas arestas estampadas são muito superficiais, da ordem de 10µm, e a deterioração da resistividade é muito pequena. Por outro lado, a deformação dos domínios magnéticos (grãos) da estrutura é mais profunda, da ordem de 10mm, e

conseqüentemente a perda por histerese sofre maior influência [17]. Os resultados das perdas magnéticas obtidas pelo ensaio feito por Boglietti são semelhantes aos apresentados por Smith [20]. Do trabalho de Boglietti, a Fig. 2.11 mostra a perda por histerese da separação das perdas magnéticas totais. As perdas magnéticas por histerese sofrem alteração significativa mantendo a mesma tendência para cada tipo de lâmina. Isto é, quanto mais arestas estampadas no material, maior sua perda por histerese. Por outro lado, a Fig. 2.12 apresenta os valores das perdas dinâmicas, e estas sofrem menos variação em função da largura de laminação, ou seja, o processo de estampagem quase não modifica as perdas dinâmicas.

Números de anéis	Comprimento da aresta estampada [mm]	Largura dos anéis [mm]	Largura total do toróide [mm]
1	1000	40,0	40,0
2	2000	20,0	40,0
3	3000	13,3	40,0
4	4000	10,0	40,0

Tabela 2.1 – Comprimento das arestas estampadas dos toróides

Estes estudos de resultados práticos revelam que o processo de estampagem produz uma deterioração na estrutura magnética com um conseqüente aumento da perda por histerese. Neste processo a resistividade do material não é afetada e, conseqüentemente, a variação das perdas dinâmicas é pequena. Talvez nas perdas dinâmicas exista uma variação da parcela das perdas excedentes, já que estas são funções da microestrutura do material.

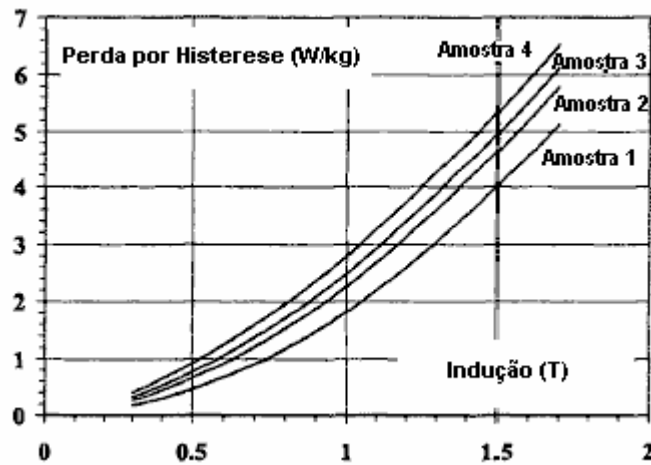


Fig. 2.11 – Perda por histerese das amostras toroidais [17]

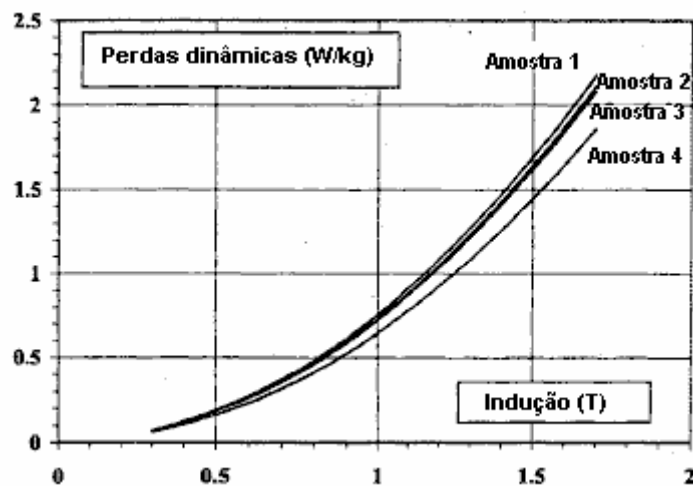


Fig. 2.12 – Perda dinâmica das amostras toroidais [17]

2.4.1 Mensuração do efeito do corte a laser nas lâminas de aço ao silício

Além do processo de estampagem das lâminas, existe também o processo de corte a laser, o qual é mais utilizado para construção de protótipos devido ao custo reduzido para quantidades pequenas. Da mesma forma como foi realizada por Smith, verificou-se a influência do corte a laser sobre as lâminas de aço. Foram escolhidas lâminas de aço totalmente processadas, de dimensões 280mm de comprimento por 0,5mm de espessura. Estas foram recortadas em 5 larguras distintas: 30, 15, 10, 7.5 e 5mm. As amostras foram divididas em dois grupos, sendo no primeiro realizado o tratamento térmico para alívio das tensões de corte, o qual denomina-se grupo de referência. O segundo grupo não foi

submetido ao tratamento térmico, mantendo então as deformações causadas pelo processo de corte a laser.

As medidas foram realizadas no equipamento SST da Brockhaus (descrito no anexo A). Neste equipamento o caminho médio do circuito magnético não varia com a largura da lâmina, como acontece no quadro de Epstein. Como a largura do equipamento é de 30mm, foram inseridas 2 lâminas de 15mm de largura, 3 lâminas de 10mm e assim sucessivamente. Esta estratégia permitiu obter um valor médio das lâminas, pois a massa de lâminas submetidas à medição permanece praticamente constante (a não ser de um fator devido às imperfeições do corte).

2.4.1.1 Medições nas lâminas tratadas termicamente

As lâminas recortadas e tratadas termicamente devem apresentar os mesmos valores de perda magnética. Ou seja, espera-se que o tratamento térmico elimine as deformações na rede cristalina dos domínios magnéticos oriundos das tensões mecânicas impostas pelo processo de corte, devolvendo as propriedades iniciais ao material. A Fig. 2.13 apresenta os resultados das medições realizadas neste conjunto de lâminas, onde se pode perceber que, para qualquer largura de corte, a perda magnética é semelhante. A variação é da ordem de no máximo 5%, não existindo nos resultados comparativos indícios de que houve deterioração do desempenho do material após o corte e o processo de tratamento térmico (as pequenas variações entre as curvas podem ser devido à diferença de massa oriunda do corte).

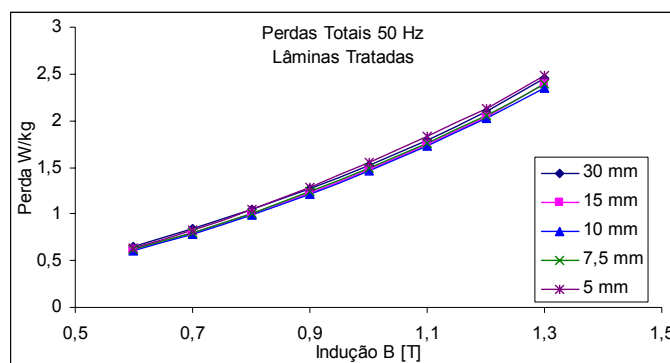


Fig. 2.13- Perda magnética total das lâminas tratadas à 50 Hz

2.4.1.2 Medições nas lâminas sem tratamento térmico

A Fig. 2.14 apresenta os resultados medidos para o conjunto de lâminas não tratadas termicamente. As lâminas que não foram tratadas possuem os efeitos das deformações da distribuição dos domínios magnéticos causados pelo corte. Conforme apresentado pelos estudos de Smith e Boglietti, a perda magnética específica deve ser maior para lâminas mais estreitas, pois estas apresentam mais arestas estampadas do que as mais largas. Nesta Fig. 2.14 estão também evidenciadas as conclusões de Smith e Boglietti.

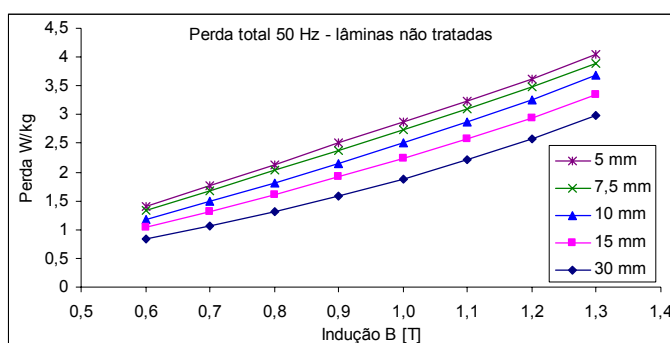


Fig. 2.14 – Valores medidos de perda total à 50 Hz

Ao realizar a separação das perdas dos resultados destes ensaios em dinâmicas e histeréticas, percebe-se variação nas perdas por histerese. A Fig. 2.15 apresenta os valores da perda por histerese, e conforme esperado, varia conforme a largura da laminação. A parcela devido às perdas dinâmicas permanece praticamente constante, pois a condutividade elétrica da lâmina não é alterada (Fig. 2.16). A Fig. 2.16 apresenta uma pequena variação das perdas dinâmicas do material, e este fato pode ser atribuído a dificuldades na separação das perdas (descrito no anexo A), entre outras.

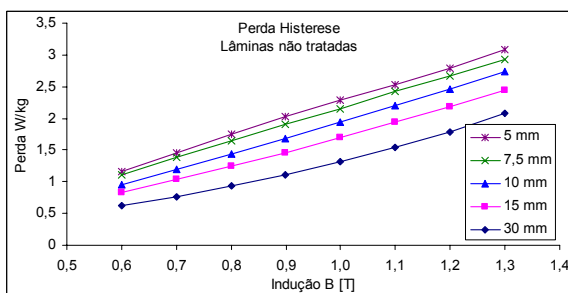


Fig. 2.15 – Valores calculados da perda por Histerese à 50 Hz

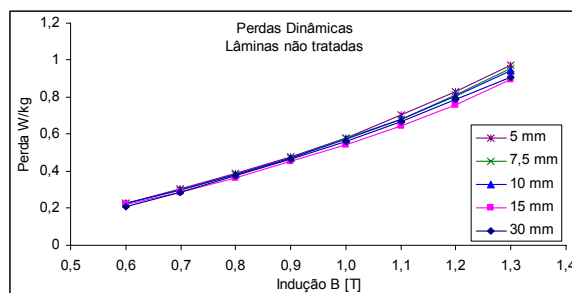


Fig. 2.16 – Valores calculados da perda dinâmica à 50 Hz

2.5 Efeito de rebarbas em estatores

Foi visto na seção sobre estampagem a formação da rebarba nas lâminas de aço ao silício e que estas são indesejáveis para a confecção dos motores. O tamanho da rebarba varia com fatores construtivos da ferramenta de corte e também com a quantidade de cortes realizada pela ferramenta. Cada vez que a prensa bate os punções de corte contra a lâmina, estes punções (bem como a matriz) sofrem desgaste. Quando o desgaste é excessivo, as ferramentas (punções e matriz) são afiadas novamente. Um dos controles de qualidade que indicam desgaste dos punções e da matriz é o tamanho da rebarba produzido pelo corte.

Para o estudo do efeito das rebarbas, um conjunto de medições foi realizado com 30 estatores montados de fábrica, com parafusos e pressão nominal de aperto de fábrica. As lâminas apresentavam diferentes tamanhos de rebarbas obtidos após o processo de estampagem da empresa Embraco. Para se ter uma quantidade significativa, confeccionou-se 10 estatores para 3 grupos distintos em função da vida útil da ferramenta:

- 1) 10 estatores estampados no início da vida útil da ferramenta
- 2) 10 estatores estampados no meio da vida útil da ferramenta
- 3) 10 estatores estampados no final da vida útil estimada da ferramenta

Utilizou-se o mesmo aço para cada tipo de estator. Ou melhor, uma bobina de aço foi utilizada para o conjunto 1 e retirada da linha de produção após a confecção deste grupo. Para confecção do grupo 2, esta bobina foi novamente inserida na linha de produção para obtenção das amostras, e igualmente para o grupo 3. Esta estratégia tem a intenção de atenuar as diferenças das propriedades intrínsecas do aço provenientes do início e do final da bobina, bem como de diferenças de lotes do material. Foram realizadas as medidas de perda magnética em cada estator através da bancada MPG 100D da Brockhaus Messtechnik (ver anexo A) e calculada a média e o desvio padrão de cada conjunto. A comparação entre os três grupos é apresentada a seguir.

A Fig. 2.17 apresenta o valor das perdas medidas à 50 Hz para o conjunto 1 e a diferença percentual dos outros dois conjuntos (conjuntos 2 e 3). A diferença entre o conjunto 1 e 2 (marcas em forma de x no gráfico) não é significativa, talvez até provocada pelo sistema de medição ou outros fatores. Na comparação entre o conjunto 1 e 3, a diferença é maior, na média de 1,6 %. Diferenças menores que 0,2% não devem ser

levados em conta, pois este é o valor da precisão do equipamento. Pode-se concluir destes testes com suas respectivas comparações que não ocorre praticamente uma diferença técnica entre os três conjuntos em termos de perda magnética. Neste ensaio, o estator com maior nível de rebarba comportou-se magneticamente de maneira semelhante ao com menos rebarba nas altas induções.

Teoricamente, a equação que rege a perda por correntes induzidas depende da variável indução ao quadrado. Se existem caminhos para correntes induzidas propiciadas pelas rebarbas, a diferença entre os conjuntos 1 e 3 deveria aumentar com aumento da indução. Entretanto isto não ocorreu.

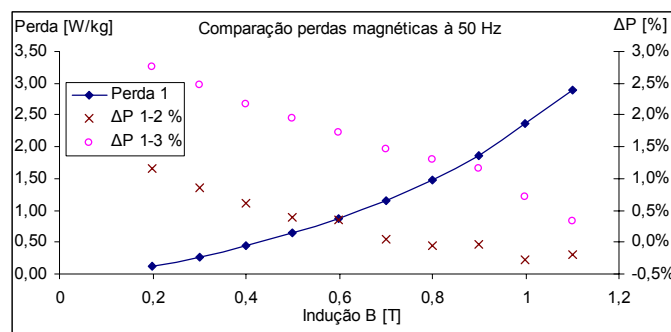


Fig. 2.17– Comparação percentual das diferenças das perdas nos grupos 1, 2 e 3

O gráfico apresentado na Fig. 2.18 mostra a comparação entre os conjuntos estudados em função da frequência de operação. A Fig. 2.18 mostra que a diferença entre os conjuntos 1 e 3 diminui com o aumento da frequência. Neste caso, a perda magnética por correntes induzidas depende do valor da frequência ao quadrado, e era esperado que a diferença entre os dois grupos aumentasse com o aumento da frequência.

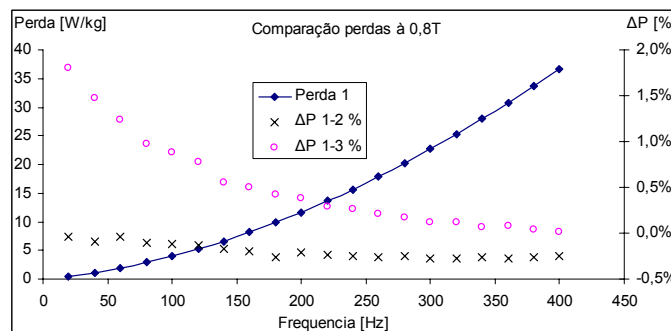


Fig. 2.18 – Comparação percentual das diferenças das perdas nos grupos 1, 2 e 3 em função da frequência

O ensaio realizado nos estatores para verificação da influência das rebarbas foi realizado no equipamento da Brockhaus, com auxílio do *ring test*, o qual magnetiza o

estator somente na região da coroa. O funcionamento real do motor não é contemplado pelo teste, pois o fluxo magnético do teste não percorre a região dos dentes. Esta verificação portanto não contempla os fenômenos que ocorrem na região dos dentes e as conclusões devem ser somente atribuídas à região da coroa. A Fig. 2.19 representa o fluxo nos dois casos, no funcionamento real do motor e sob ensaio.

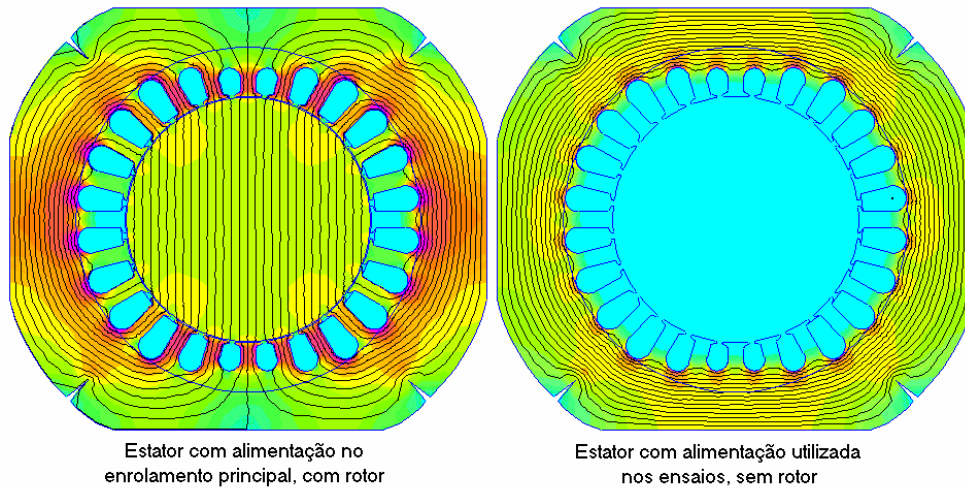


Fig. 2.19– Distribuição do fluxo magnético no estator

2.6 Considerações finais

Foram vistos neste capítulo alguns dos fatores que afetam as propriedades magnéticas do aço, a estampagem e o tratamento térmico. O tratamento térmico serve principalmente para melhorar as qualidades do aço, diminuindo as perdas magnéticas (pelo processo de crescimento dos grãos, o qual diminui a perda por histerese) e elevando o valor da permeabilidade. A estampagem produz tensões mecânicas na microestrutura do material, aumentando a perda por histerese. Isto pode ser corrigido através do tratamento térmico.

O processo de estampagem desgasta as ferramentas de corte, ocorrendo o aparecimento das rebarbas, as quais são prejudiciais para a estrutura magnética, pois ao montar o estator, estas rebarbas proporcionam caminhos alternativos para as correntes induzidas, aumentando a perda dinâmica. O aparecimento das rebarbas pode ser evitado afiando-se as ferramentas de corte periodicamente, o que eleva o custo de produção. Também pode ser utilizado lubrificante ou revestimentos nas lâminas para elevar o grau de

estampabilidade e reduzir o tamanho das rebarbas, retardando a necessidade de afiar as ferramentas. Conforme os estudos e ensaios realizados em estatores da EMBRACO, a deterioração do desempenho magnético não foi constatada, demonstrando que as rebarbas aparentemente não afetam o desempenho magnético dos estatores em termos das perdas magnéticas. Convém se ter uma postura de prudência na análise e utilização destes resultados dos ensaios realizados. Pode ser que no desempenho de estatores com campos magnéticos rotativos e com o motor sob carga, as rebarbas tenham uma influência indesejável. O desgaste das ferramentas também modifica as dimensões físicas das peças estampadas, aumentando o tamanho do entreferro entre o rotor e o estator, assunto este que não faz parte dos objetivos deste trabalho.

3 Estudo da isolamento interlaminar em estatores

A empresa Embraco forneceu estatores preparados para um estudo experimental das perdas interlaminares. Estes estatores formam conjuntos distintos, alguns com folhas de papel entre lâminas, com pressão de aperto diferente e com lâminas lixadas. Tomando como base procedimentos realizados na literatura, fez-se uma primeira análise dos estatores montados em fábrica, com parafusos de fixação originais, sem alterar qualquer característica de como eles foram entregues ao Grucad. Os resultados que serão apresentados neste capítulo são analisados e comparados com resultados da literatura. Ocorreram alguns resultados não esperados, os quais foram semelhantes aos encontrados na literatura. Ao final, mostra-se que os parafusos de fixação dos estatores, e possíveis efeitos de contatos elétricos por rebarbas (em especial nos estatores com lâminas isoladas com papel), interferem no comportamento eletromagnético do estator. Assim, as análises realizadas não são conclusivas, pois os resultados experimentais são afetados por efeitos não levados em conta no estudo. O motivo de se apresentar este estudo experimental é documentar as dificuldades encontradas, comparar os resultados obtidos com aqueles apresentados na literatura, e criar argumentos de justificação do desenvolvimento de procedimentos experimentais mais adequados aos objetivos deste trabalho.

Além do estudo experimental, ainda neste capítulo serão abordados os tipos de revestimentos de lâminas, suas funções e como se realiza a medida da resistência elétrica do revestimento.

3.1 Tipos de revestimento de lâminas

O revestimento das lâminas intenciona que correntes induzidas sejam confinadas nas lâminas individuais, não percorrendo outras lâminas e, conseqüentemente, outros caminhos. Quando há um contato elétrico entre as lâminas, as perdas dinâmicas são diretamente afetadas, em específico às chamadas perdas entre lâminas, ou interlaminares. O propósito principal da isolamento é a minimização das correntes entre lâminas, e conseqüentemente das perdas interlaminares (uma parcela das perdas magnéticas dinâmicas em um pacote montado). Além disso, alguns revestimentos melhoram o processo de estampagem das lâminas, como será visto a seguir.

Um bom número de revestimentos tem sido desenvolvido ao longo dos anos, porém ainda não foi instituído um documento que normalizasse uma classificação. A nomenclatura mais conhecida e utilizada foi publicada pelo Instituto Americano do Ferro e Aço (American Iron and Steel Institute) – AISI, onde os principais revestimentos são classificados da seguinte maneira [16]:

C-0 Refere-se às camadas naturais de óxido provenientes do tratamento térmico no aço ao silício laminado, as quais dão uma frágil, porém efetiva camada de isolamento, suficiente para a maioria das pequenas estruturas. Esta superfície oxidada pode ser aprimorada controlando a atmosfera no processo de recozimento para proporcionar mais ou menos óxido isolante na superfície da lâmina.

C-2 Refere-se a uma camada de isolamento inorgânica, tal como uma capa de vidro formada durante o temperamento hidrogenado em altas temperaturas do aço ao silício de grão orientado. É resultado da aplicação de MgO e silicato na superfície do aço. Esta isolamento é preferida para estruturas refrigeradas a ar ou a óleo. Por causa da natureza abrasiva do revestimento, ela dificulta o processo de estampagem, desgastando as ferramentas de corte. Permite recozimento e tratamento térmico se necessário.

C-3 Consiste em uma isolamento orgânica de esmalte ou verniz. É aplicada em estruturas refrigeradas a ar ou imersas em óleo. Eleva a capacidade de estampagem em termos da vida útil da ferramenta de corte. Este revestimento é perdido durante o tratamento térmico.

C-4 Este revestimento consiste em um tratamento químico ou superfície de fosfato para ser utilizado em estruturas a ar ou óleo que requerem moderados níveis de resistência de isolamento. Serve também para melhorar a estampagem. Não é perdido durante o tratamento térmico.

C-5 É uma isolamento inorgânica similar a C-4, mas com enchimentos de cerâmica adicional para melhorar a resistência interlaminar. É tipicamente aplicada em cima da C-2 em aços de grão orientado. É principalmente utilizada em estruturas refrigeradas a ar ou imersas em óleo que operam com alta tensão por volta de bobina.

Cada revestimento possui uma resistência de isolamento própria, e esta varia com a espessura da camada isolante [21, 22]. Deve-se atentar que a resistência de isolamento não é o único fator decisivo na escolha do revestimento. Como visto na classificação acima, alguns revestimentos têm a propriedade de melhorar a estampagem das lâminas, mas alguns não resistem ao tratamento térmico.

3.2 Testes para medição da capacidade de isolamento entre lâminas

Cada revestimento aplicado à superfície da lâmina apresenta um valor de resistividade que varia de acordo com o tipo e a espessura do revestimento. Vários testes de isolamento das lâminas foram desenvolvidos para medir a resistividade elétrica proporcionada pelos revestimentos, sendo o método de Franklin o mais aceito e conhecido (descrito na IEC 404.11 e na ASTM método A717). O teste é realizado da seguinte forma: dez eletrodos metálicos com área total de contato de 654 mm^2 são aplicados na superfície revestida da lâmina a ser testada. Aplica-se uma tensão estabilizada de 500mV em cada eletrodo, sendo conectados resistores de 5 ohms em cada eletrodo para limitar a corrente em 1A no caso de curto-circuito. Os eletrodos são dispostos em duas colunas de cinco. O contato elétrico com a amostra é feito com duas brocas de 3mm que perfuram a isolamento. A amostra é então colocada entre a base e os eletrodos e aplicado uma força de 1290N (o que equivale a uma pressão de 2 N/mm^2). São realizadas N medidas em diferentes pontos da lâmina. A corrente total é medida e, através de (3.1), é calculado o coeficiente da resistência de isolamento da superfície.

$$C = A \left[V / \left(\frac{1}{N} \sum I_j \right) - \frac{R}{10} \right] \Omega \text{ mm}^2 \quad (3.1)$$

Na equação (3.1), R é o resistor (5Ω), N o número de medidas, A a área dos eletrodos (645 mm^2), V a tensão (500mV), e I_j a corrente total.

A Fig. 3.1 representa o esquema do princípio do teste.

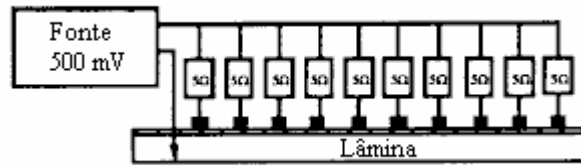


Fig. 3.1 – Princípio de medição do Dispositivo de medida Franklin [21]

Estudos realizados por Marion-Péra [21] mostram que as medidas realizadas apresentam uma dispersão de valores muito grande. Assim, utilizar o valor médio não é um critério suficiente para avaliação da qualidade da isolamento. A autora investigou a repetibilidade da experiência com dez medidas no mesmo ponto e altos valores de desvio padrão foram encontrados (até mais de 100%). Este fenômeno é atribuído ao fato do contato eletrodo-revestimento ser mais ou menos randômico. Porém, com a aplicação de uma camada de pintura metálica sobre o revestimento antes das medidas, os resultados são muito mais reprodutíveis e o desvio padrão das medidas cai a poucos por cento. Quarenta e sete medidas foram realizadas com o eletrodo no mesmo ponto e outras 47 medidas com o eletrodo em pontos diferentes. Os dois histogramas de corrente das medidas foram suficientemente diferentes, demonstrando que o teste de Franklin é destrutivo e não pode ser repetido no mesmo ponto. Nesta publicação, a autora não divulgou os resultados gráficos, apenas concluindo que o teste de Franklin é destrutivo.

A influência da pressão de contato dos eletrodos também é discutida por Marion-Péra. Estudos realizados por ela mostram que o coeficiente de resistência da superfície diminui com o aumento da pressão de teste, algo até esperado. A escolha de um valor ótimo para este teste não é trivial. Por um lado, deseja-se uma pressão suficiente para estabilizar o contato entre eletrodo e revestimento, por outro, o teste deve ser o mais próximo da realidade das máquinas elétricas. Este critério não é viável, pois as lâminas não são pressionadas homogeneamente. A pressão do teste de Franklin de 2 N/mm^2 com certeza é maior que o valor médio nas máquinas, mas justificado pelo fato de que o revestimento deve ser submetido ao pior caso.

Um outro teste desenvolvido pela *British Steel Electrical*, reportado em [21], toma como princípio o teste de Franklin. Este dispositivo permite que ambos os lados da lâmina sejam testados simultaneamente, ou seja, dois revestimentos em série no caso de lâminas revestidas em ambos os lados (vide Fig. 3.2).

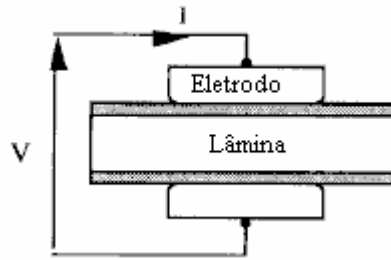


Fig. 3.2 – Variação do teste de Franklin para lâminas com duplo revestimento [21]

3.3 Análise do desempenho magnético de estatores

Somente o valor de resistividade do revestimento da lâmina não é suficiente para garantir as características desejadas para o núcleo magnético. No momento da construção do estator, por exemplo, vários fatores interferem na resistividade (ou no contato elétrico) entre lâminas adjacentes. A presença de elementos que provocam o contato elétrico entre lâminas, como as rebarbas, soldas ou parafusos para fixação das lâminas, afeta as propriedades magnéticas do estator como um todo.

Para verificar o funcionamento e eficiência dos estatores, considerando além da resistência de isolamento os efeitos das rebarbas e eventuais contatos entre lâminas, seria necessário montá-los e comparar com medidas realizadas com e sem revestimento nas lâminas, ou então com a presença dos elementos de manufatura (rebarbas de tamanhos diferentes, soldagens, parafusos, etc), estudando as várias possibilidades de influência dos detalhes construtivos.

Um destes estudos foi realizado por Beckley [23, 24], o qual verificou o efeito da espessura da isolamento das lâminas em pacotes de toróides. A Fig. 3.3 mostra a influência da espessura do revestimento das lâminas nas perdas totais, tendo uma variação das perdas menor que 7 %. Nesta figura, a referência é a perda obtida com a lâmina de revestimento espesso. Quanto mais fino o revestimento, maior é a perda magnética. Note também que conforme o valor de indução aumenta, a diferença relativa diminui, como nos ensaios obtidos e mostrados na figura 2.17. Esperava-se que as perdas dinâmicas aumentassem, pois esta é função da indução máxima elevada ao quadrado (vide equação 1.26).

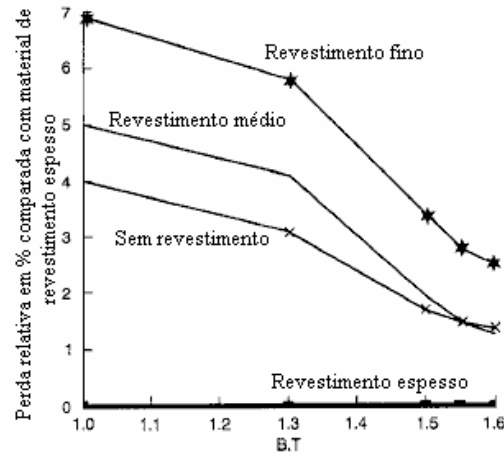


Fig. 3.3 - Efeito do revestimento na perda total [23]

Os resultados de Beckley parecem contraditórios, pois geralmente as perdas dinâmicas (correntes induzidas) crescem mais do que a de histerese com o aumento da indução (nos aços de grão não-orientado, o expoente de B_m do modelo de Steinmetz varia entre “1,4” a “1,8”, e o das correntes induzidas calculadas de maneira clássica com o expoente “2”). Outro resultado, em princípio contraditório, é que as perdas para chapas sem revestimento são menores do que as que possuem revestimento médio e fino.

O objetivo de Beckley foi averiguar a eficácia dos revestimentos (isolação) entre lâminas. Deste estudo, onde apareceram resultados contraditórios e por isso podem estar havendo influência de outros parâmetros e fenômenos que não foram controlados durante os ensaios, resulta a seguinte conclusão: o desempenho de estatores sem revestimento é quase tão bom quanto com revestimento fino, com uma diferença máxima de 7%.

Sob o ponto de vista da fabricação de núcleos magnéticos, a presença do revestimento adequado nas lâminas retarda a formação de rebarba durante a estampagem, aumentando a vida útil do equipamento de estampagem [16, 18, 23], e também diminui o efeito das pequenas rebarbas, prevenindo a degradação do desempenho elétrico das pequenas máquinas [16].

Outra experiência realizada por Beckley foi a verificação do desempenho magnético dos estatores soldados pelo lado de fora e também pelo lado de dentro do pacote. Comparado com um pacote com solda apenas no lado de fora, a Fig. 3.4 mostra uma variação muito significativa, de mais de 300%. Este ensaio leva a conclusão que ao fornecer um caminho sólido para as correntes induzidas, juntando as lâminas nas suas arestas, as perdas magnéticas aumentam consideravelmente.

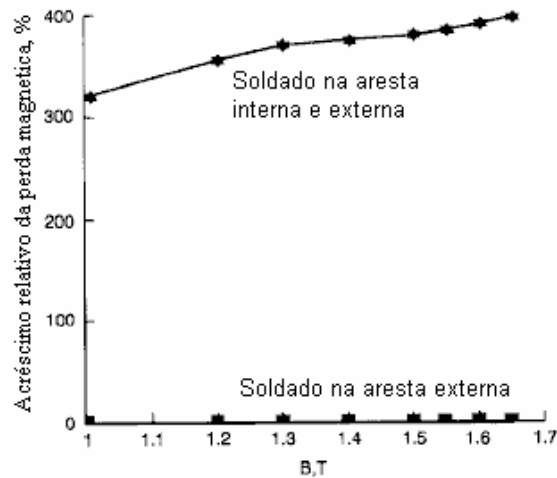


Fig. 3.4 – Perda magnética relativa no toróide com soldas na borda externa comparada com toróide com soldas nas bordas exterior e inferior [23]

Beckley também simulou o comportamento de motores, montando estatores soldados no lado de fora e com a presença de rebarbas nas regiões dos dentes. Ele percebeu um aumento de mais de 25% em relação ao estator sem a solda na circunferência externa. A Fig. 3.5 ilustra os resultados, onde também é apresentado uma medição realizada com papel entre as lâminas e sem papel entre as lâminas (aço nu). Contrário às expectativas, a separação das lâminas de aço com papel deveria melhorar o rendimento do pacote, pois eliminaria uma parcela da perda dinâmica. Como apresentado na Fig. 3.5, o desempenho do estator com papel entre lâminas é pior do que aquele com aço nu e sem solda externa.

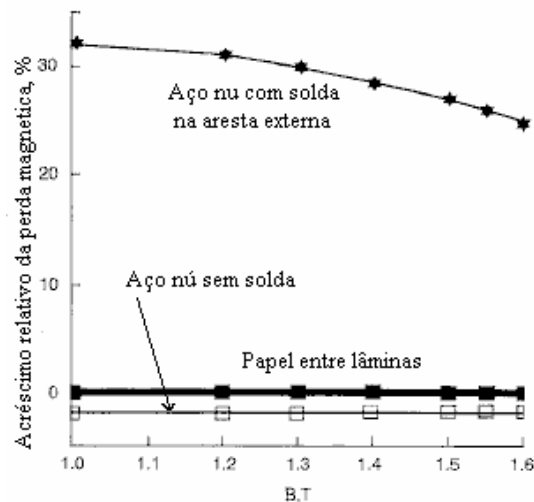


Fig. 3.5 - estator com solda exterior e rebarbas nos dentes [23]

3.4 Estudo de estatores com diferentes tipos de isolações entre lâminas

Esta seção trata de um estudo experimental em uma série de estatores confeccionados com diversas características. O objetivo foi de obter diretrizes para a análise dos efeitos dos revestimentos. Este estudo foi sugerido pelos pesquisadores do Laboratório de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos – GRUCAD e da Embraco durante o desenvolvimento do projeto que financiou em parte este trabalho. Também foram utilizados os procedimentos e tipos de ensaios realizados por Beckley. Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios estão descritos no anexo A.

Como estes estudos envolvem questões estatísticas, apresentar-se-á conjuntamente um método aplicado à abordagem a fim de auxiliar a análise dos resultados e trabalhos correlacionados.

3.4.1 Descrição e nomenclatura dos tipos de estatores e suas isolações

Para o ensaio, 16 amostras de estatores foram selecionadas e fornecidas pela Embraco S.A., formados por lâminas de aço do tipo E230 da Acesita, com cobertura **C-0** (óxido natural) nas chapas. As 16 amostras de estatores foram divididas em quatro tipos (formando quatro conjuntos de quatro estatores semelhantes) de acordo com a montagem de cada pacote, denominadas pelas letras **N**, **L**, **A**, **P**, e que possuem as seguintes características em termos de isolação:

N – lâminas normais com camada isolante de óxido C-0, obtidos pelo processo de “azulamento”;

L – lâminas lixadas para retirada do revestimento normal (óxido natural);

A – lâminas tipo **N**, porém o pacote foi montado com uma pressão de aperto nos parafusos de fixação 3 vezes maior que os estatores do grupo **N**;

P – lâminas tipo **N** com papel de espessura 0,035mm entre cada lâmina com o intuito de isolar eletricamente as lâminas no pacote.

A Fig. 3.6 mostra cada tipo de estator em função da isolação entre lâminas.



Fig. 3.6 – Os quatro tipos de estatores em função da isolamento entre lâminas

O objetivo do ensaio é verificar a influência do revestimento **C-0** através da comparação dos resultados provenientes de cada grupo de estatores. Neste caso a pressão de aperto dos parafusos também foi estudada.

3.4.2 Verificação da suficiência da quantidade de amostras

Realizou-se um estudo estatístico a fim de verificar se as quantidades de amostras e de ensaios seriam suficientes para validar os experimentos em si, bem como os resultados advindos dos mesmos. A verificação estatística somente é possível após ter sido realizado um conjunto de ensaios, pois depende dos valores de média e desvio padrão medidos. Foram realizadas as medições e aplicou-se a posteriori o teste estatístico “*diferença das médias*” [25], comparando valores medidos em amostras diferentes para se certificar de que as diferenças medidas entre os grupos não são devidas ao acaso. Se o resultado do teste for satisfatório, o tamanho de amostras é considerado suficiente.

Foram realizadas medidas em diferentes induções e frequências nas 4 amostras de estatores de cada um dos conjuntos **N**, **L**, **A** e **P** e submetidas à técnica de estatística denominada diferença de médias, da Teoria das Pequenas Amostras [25]. Aplicando o método para este caso, têm-se os seguintes dados e nomenclatura:

Quantidade das amostras: $N_1 = 4$; $N_2 = 4$;

Média dos N_1 valores: X_1 ; Média dos N_2 valores: X_2 ;

Desvio padrão dos N_1 valores: s_1 ; Desvio padrão dos N_2 valores: s_2

Graus de liberdade: $\gamma = N_1 + N_2 - 2$; $\rightarrow \gamma = 6$

Assume-se que as médias e desvios padrões assumem distribuição normal. Aplica-se então o teste para provar que as amostras vêm de uma mesma população (isto é, suas

médias e desvios padrões devem ser iguais), adotando-se o escore ts , da distribuição ts de Student, dada por (3.2).

$$ts = \frac{X_1 - X_2}{\psi \cdot \sqrt{1/N_1 + 1/N_2}}, \text{ onde } \psi = \sqrt{\frac{N_1 \cdot s_1^2 - N_2 \cdot s_2^2}{\gamma}} \quad (3.2)$$

Localiza-se na tabela da distribuição de Student (anexo B) [25] o valor do coeficiente crítico (t_c), correspondente ao nível de significância de 1%, por exemplo, resultando em uma confiabilidade de 99%.

Caso o valor do coeficiente de confiança ts encontrado por (3.2) seja maior que o encontrado na tabela de coeficientes de Student (t_c), então se rejeita a hipótese de que as amostras vêm de uma mesma população. Ao rejeitar a hipótese, confirma-se que os valores medidos são provenientes de populações diferentes e as diferenças de resultados não são devido ao acaso.

Exemplificando o teste, faz-se a comparação entre a media dos estatores do grupo **N** e **P**, à frequência de 60Hz e indução de 1,0T. Tem-se as seguintes hipóteses, a qual se quer verificar:

H₀: as amostras são do mesmo lote, e as diferenças medidas são devido ao acaso.

H₁: os conjuntos de amostras são de lotes diferentes (neste caso em específico, a inserção do papel modificou as características do estator).

O valor médio da perda magnética do grupo **N** é dado por $X_1 = 3,08$ W, e do grupo **P** por $X_2 = 3,14$ W, com desvios padrão de $s_1 = 0,021$ e $s_2 = 0,011$. O valor de ts calculado através da equação (3.2) é $ts = 4,48$. Na tabela dos coeficientes de Student, encontra-se para $\gamma = 6$ e nível de significância de 1% o valor de $t_c = 3,707$. Como $ts > t_c$ então a hipótese **H₀** é rejeitada, e se aceita a hipótese **H₁**. No caso sabe-se que nos estatores foram inseridos papéis entre as lâminas e, obviamente, o teste resultou como se fossem estatores diferentes, como de fato assim o são.

Tomando como referência o conjunto dos estatores tipo **N** (Normal), foi realizado o teste de diferença de médias para cada um dos outros três grupos (**L**, **A**, **P**). Para o grupo **N** e **A** todas as medidas foram aceitas. Para o grupo **P** 25% das 38 medidas foram classificadas como diferenças devido ao acaso. Estas medidas foram rejeitadas na análise e comparação entre os quatro tipos de estatores.

3.4.3 Medidas do efeito das isolações nos quatro tipos de estatores

Os estatores dos quatro grupos foram submetidos aos testes para a medição das perdas magnéticas utilizando a bancada Brockhaus descrita no anexo A. A medida correspondente a cada um dos tipos é composta por valores médios obtidos no ensaio de cada um dos quatro estatores do grupo. A comparação dos grupos **L**, **A** e **P** foi realizada em relação ao grupo de referência **N**, utilizando a equação (3.3), onde V_x é o valor a ser comparado com o valor de referência V_r , resultando uma diferença relativa em porcentagem Δx .

$$\Delta x[\%] = \frac{V_x - V_{ref}}{V_{ref}} 100 \quad (3.3)$$

A Fig. 3.7 apresenta os resultados de comparação para uma frequência fixa de operação de 60Hz variando a indução máxima e a Fig. 3.8 apresenta os resultados para a a indução fixa em 0,9T variando a frequência de operação.

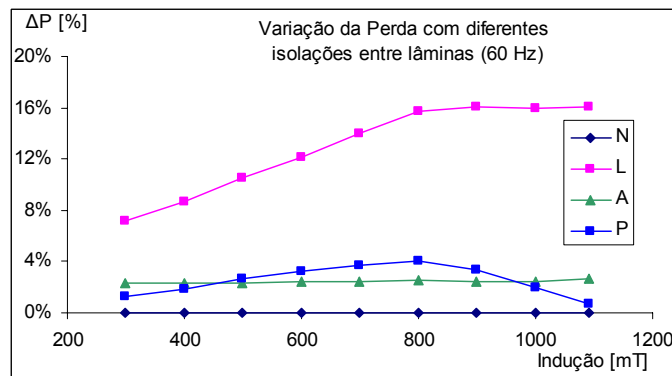


Fig. 3.7– Comparação das perdas totais para cada tipo de estator à 60Hz

Analisando os resultados para uma frequência fixa (Fig. 3.7), a variação percentual das perdas totais das amostras do tipo **L** foi significativamente maior que as outras. Isto já era esperado, pois estas não possuem o revestimento **C-0**. A diferença aumentou até uma indução de 0,8T, permanecendo constante acima desta indução. Este é um fato intrigante, pois a parcela dinâmica aumenta com o crescimento da indução ao quadrado. Esperava-se que esta diferença aumentasse com o aumento da indução. Quanto ao grupo **A**, com a pressão de aperto das lâminas de 3 vezes maior que a nominal, um contato maior entre as lâminas é provocado, aumentando a perda magnética. Constatou-se para toda a faixa de indução um aumento médio de 2,4%. Isto está indicando que não houve praticamente um aumento das perdas dinâmicas, e portanto das perdas interlaminares. Para o grupo **P**,

esperava-se uma perda magnética menor do que a do grupo **N**, o que não ocorreu devido à presença dos parafusos de fixação. Este resultado é semelhante ao encontrado por Beckley no estator com papel entre as lâminas, o qual apresentou eficiência menor do que um estator normal (Beckley não especifica de como foram fixadas as lâminas do estator). Nos estatores ensaiados da forma como vieram da fábrica, os parafusos de fixação tornavam a isolamento elétrica entre as lâminas imperfeita, curto-circuitando algumas lâminas entre si, formando blocos isolados de lâminas no pacote. No capítulo a seguir, serão realizados ensaios sem a presença dos parafusos com o intuito de analisar somente a presença (ou a inexistência) da isolamento interlaminar.

Um comportamento anormal também ocorreu nos estatores tipo **P**: a variação da perda magnética relativa ao estator normal aumenta com o crescimento da indução até 0,8T, e após este valor, esta diferença começa a decair.

Analisando o comportamento dos estatores com relação à variação da frequência da Fig. 3.8, para uma indução constante de 0,9T, de 20Hz à 400Hz, o acréscimo do grupo **L** foi de 10% a 25%. Comprovando que não há variação de perdas magnéticas dinâmicas nestes estatores com aperto maior do pacote em relação ao normal, o grupo **A** apresentou uma perda constante um pouco maior que o grupo **N**. Inexplicavelmente também aqui a perda nos estatores com a inserção de papel entre as lâminas foi maior do que os estatores normais. Este fato também ocorreu nos ensaios realizados por Beckley (vide Fig. 3.5).

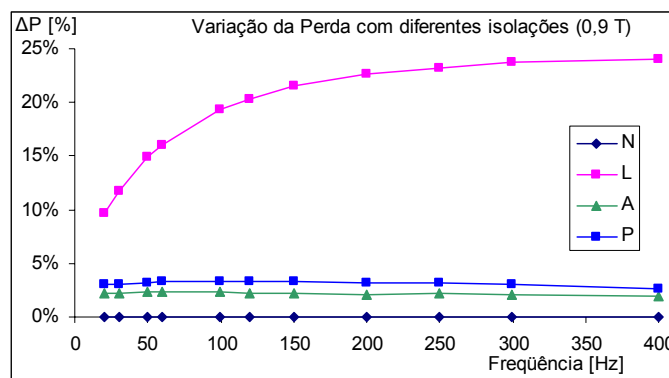


Fig. 3.8– Comparação das perdas totais para cada tipo de estator à 0,9T.

Realizou-se a separação das perdas magnéticas em histerese e dinâmica através dos programas numéricos da própria bancada Brockhaus, a qual é realizada automaticamente. A Fig. 3.9 apresenta a diferença percentual entre as perdas por histerese de cada grupo de estatores, tomando como referência o grupo **N**. O processo de lixar as lâminas modificou

a microestrutura superficial do material do grupo **L**, introduzindo tensões mecânicas e aumentando a perda por histerese [15] (este tópico será abordado mais adiante). Quanto ao grupo **A**, sabe-se que a pressão mecânica tem influência sobre a perda por histerese [26], explicando o aumento deste tipo de perda. O grupo com papel entre lâminas apresentou uma perda por histerese maior (curva em azul) do que o grupo normal. Este fato não era esperado e não se encontrou uma explicação para o mesmo. Porém, o processo de desmontar o pacote, inserir o papel e remontá-lo novamente pode ser uma razão para o aumento da perda por histerese, inclusive explicando os resultados anteriores mostrados na Fig. 3.7 e na Fig. 3.8.

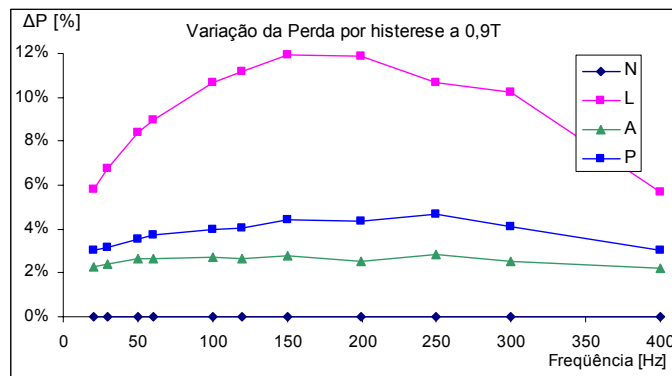


Fig. 3.9– Comparação das perdas por histerese em cada tipo de estator a 0,9T

A Fig. 3.10 mostra a comparação entre os tipos de estatores relativa às perdas dinâmicas, as quais são proporcionais à frequência e à indução ao quadrado. Como já mencionado, as perdas dinâmicas são função das correntes induzidas no interior da lâmina, entre caminhos condutores existentes no pacote das mesmas e da condutividade elétrica entre as lâminas. Se não houvesse alternância da condutividade total do pacote, os resultados dos ensaios dos estatores seriam próximos, resultando também que as diferenças medidas seriam devido ao acaso na aplicação do teste estatístico. Nos resultados apresentados na Fig. 3.10, a perda dinâmica nos estatores com chapas lixadas é bem maior que para os outros tipos. Nas amostras do tipo **L** sem a proteção natural do óxido, as correntes de Foucault têm um caminho livre entre as lâminas vizinhas para circular.

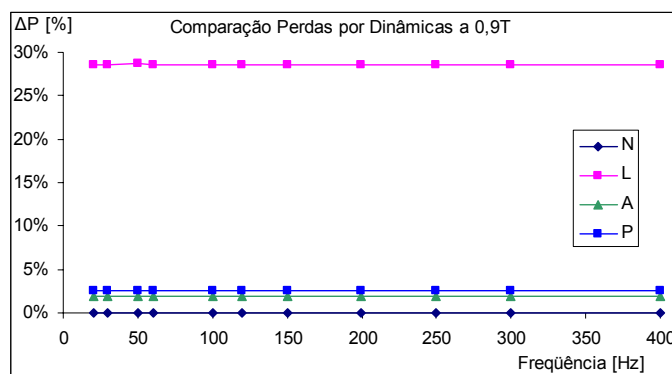


Fig. 3.10 – Comparação das perdas dinâmica para cada tipo de estator

O conjunto de estatores tipo **A**, montados sob uma pressão de 3 vezes maior em relação aos outros, apresentou uma perda dinâmica 1,9% maior que o grupo **N**. Isso é explicado pelo fato de que o contato entre as lâminas é maior devido à pressão entre elas, aumentando a condutividade elétrica entre lâminas ou o contato das possíveis rebarbas que aí existam.

O método de separação das perdas utilizado pela bancada Brockhaus separa as perdas em duas componentes com determinação da perda por histerese pelo método de tendência à operação na frequência nula. Utilizou-se outro método de separação das perdas para análise e comparação entre os tipos de estatores. O método numérico desenvolvido por F. Mendes [6] foi utilizado para encontrar os coeficientes de Histerese (k_h), de Foucault (k_f) e Excedente (k_e). A Fig. 3.11 apresenta os valores dos coeficientes da separação de perdas, multiplicados por um fator 1000. Vários valores encontrados são próximos aos valores encontrados pelo programa da bancada Brockhaus. Supondo o grupo **N** como grupo de referência, os coeficientes do grupo **L**, k_h e k_f , aumentaram, conforme o esperado. O grupo **A** apresentou k_h maior (algo esperado, pois a pressão aumenta a perda por histerese), mas k_f menor (o que não era esperado, pois a pressão aumentaria o contato entre lâminas e, conseqüentemente, o k_f). Quanto ao grupo **P**, o k_f diminuiu como o esperado, pois o papel isolou algumas lâminas, mas o k_h aumentou, o que poderia ser explicado pela medida da perda total, que foi maior que o grupo **N**.

Os resultados não podem ser explicados totalmente também por meio da separação das perdas utilizando o método de F. Mendes [6], sendo necessário talvez medir a perda por histerese em cada pacote, na frequência de 1 Hz, por exemplo.

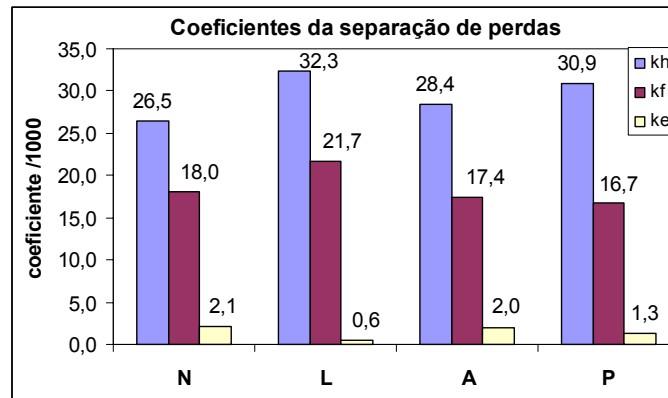


Fig. 3.11 – Valores dos coeficientes calculados através da separação numérica à 60 Hz

3.4.4 Análise da perda por histerese nos estatores do grupo N e L

O processo de retirada do revestimento C-0 das lâminas de aço silício introduz deformações mecânicas na micro-estrutura dos grãos magnéticos deixando-a menos homogênea do que inicialmente [15]. Os estatores do grupo L sofreram este processo de raspagem (com uma lixa fina) e a qualidade do mesmo provavelmente foi afetada. Para verificar se este fenômeno ocorreu, foi realizada a medida da perda por histerese nos estatores dos grupos N e L, na frequência de 1 Hz, com uma variação do fluxo de 0,4T até 1,2T. O equipamento utilizado para a realização da medida da perda por histerese foi a bancada de caracterização de materiais desenvolvida no GRUCAD [27]. Os valores médios dos estatores de cada grupo obtidos da medição são mostrados na Fig. 3.12 juntamente com a diferença percentual no segundo eixo, tomando a medida do grupo N como referência. A diferença média dos dois grupos foi da ordem de 3,2%.

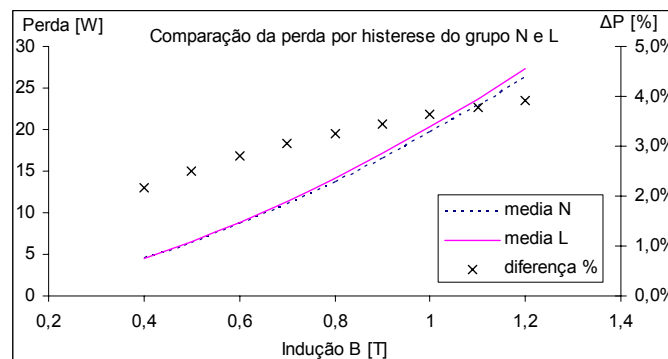


Fig. 3.12 – Comparação dos estatores do grupo N e L

A diferença da qualidade dos tipos de estatores é mais evidente na curva de histerese de dois estatores de cada grupo, denominados N2 e L2. As curvas foram obtidas em um mesmo ponto de operação. Pode-se perceber que a diferença de área dos dois laços ocorre pelo aumento do valor do campo magnético H na região de maior indução B , sendo que o estator com lâminas lixadas tem um $H_{\text{máx}}$ maior. Na análise das curvas de histerese entre os dois tipos de estatores, a variação da área da curva de histerese (que pode ser vista na Fig. 3.13) foi praticamente ocasionado pela mudança do valor de $H_{\text{máx}}$, e não pelo deslocamento do campo coercitivo H_c no eixo de campo magnético (alterações nos valores de H_c deixam o laço BH com área interna maior com tendência ao formato circular).

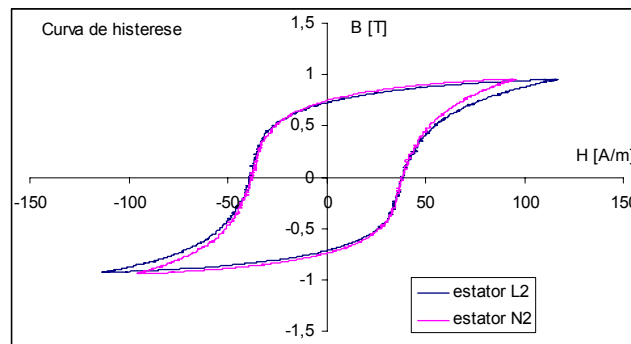


Fig. 3.13 – Curvas de histerese (medidas a 1 Hz) dos estatores N2 e L2.

A mudança dos pontos $H_{\text{máx}}$ e $B_{\text{máx}}$, conforme pode ser verificado na Fig. 3.13, modifica o valor da permeabilidade total do pacote, e conseqüentemente a curva de magnetização inicial (vide Fig. 3.14). O processo de lixar as lâminas modifica então a qualidade do material pela modificação da distribuição homogênea dos grãos do material de maneira semelhante ao processo de estampagem. No processo de lixar a lâmina, a degradação ocorre da superfície para o interior, enquanto que o de estampagem ocorre das bordas das lâminas para o interior.

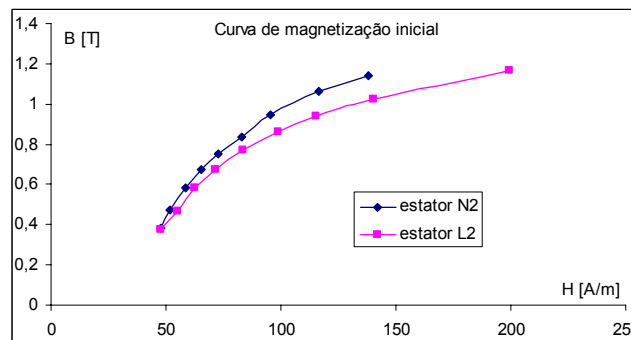


Fig. 3.14 – Curva de magnetização inicial dos estatores N2 e L2.

Na análise das curvas de histerese entre os dois tipos de estatores, a variação da área da curva de histerese, visto na Fig. 3.13, foi praticamente toda ocasionada pela mudança do valor de $H_{m\acute{a}x}$, e não pelo deslocamento do campo coercitivo H_c (o qual deixaria o laço BH com área interna maior, com tendência para uma curva no formato circular).

3.5 Considerações finais

Este capítulo tratou do estudo da isolamento das lâminas utilizadas nos motores e transformadores. Foi visto que alguns revestimentos de lâminas possuem propriedades que melhoram a estampagem dos processos (C-3 e C-4), sendo o mais utilizado o revestimento C-0, pois é formado no processo de tratamento térmico. A resistividade de cada revestimento pode ser medida através do teste de Franklin, o qual é um teste destrutivo e necessita de várias amostras ensaiadas para se ter um valor médio.

Nos estudos realizados por Beckley foi visto que os estatores soldados na borda externa apresentam um acréscimo de 30% nas perdas magnéticas. Se ambas as bordas externa e interna forem soldadas, a perda magnética aumenta 300% devido aos caminhos sólidos proporcionados pelas soldas.

O processo de lixar as lâminas modificou a micro-estrutura do material, afetando a perda por histerese. Foi visto que a variação do laço BH neste caso aconteceu nos valores próximos de $H_{m\acute{a}x}$, indicando que o material necessita de um campo magnético maior para mover as paredes dos domínios (que foram desorganizadas com o processo de lixar).

Neste capítulo, apresentou-se um dos primeiros conjuntos de ensaios referentes às perdas interlaminares realizados no GRUCAD. Os estatores que foram montados com lâminas nuas (sem revestimentos) apresentaram perda magnética maior que o normal. Conforme a frequência aumenta, estas perdas aumentaram também, indicando que o estudo das perdas interlaminares seria possível de ser realizado. A inserção de papel entre as lâminas apresentou resultados inesperados, e isso serviu como ponto de partida para explorar a influência de detalhes construtivos no desempenho do estator. Nos capítulos seguintes serão abordados aspectos isolados, como a influência dos parafusos, da pressão e do revestimento.

4 Método para avaliação das perdas interlaminares

Neste capítulo, propõe-se uma metodologia de separação e determinação da perda interlaminar e de fenômenos associados. As perdas interlaminares nos núcleos ferromagnéticos estão relacionadas com as correntes de Foucault que circulam entre as lâminas do mesmo pacote. A isolamento entre as lâminas interfere no desempenho magnético do núcleo, pois o contato entre duas lâminas proporciona caminhos alternativos para o estabelecimento de correntes induzidas. Este contato varia de acordo com duas importantes variáveis: a própria isolamento entre as lâminas e a pressão de contato entre elas (geralmente atribuída ao aperto e fixação do pacote). A pressão afeta também as perdas por histerese (o valor da perda por histerese é dependente do valor de pressão que se aplica na compressão da lâmina [26]), sendo assim um fenômeno difícil de ser abordado experimentalmente. Ao se aumentar a pressão de compressão das lâminas do pacote, diminui-se a isolamento entre as lâminas, pois quanto maior a pressão, maior a probabilidade de haver contatos entre lâminas. Rebarbas, poeira, imperfeições na laminação bem como falhas nos revestimentos das lâminas são fatores que propiciam a existência de perdas interlaminares. A mensuração das perdas interlaminares é de difícil realização, pois além de muitas variáveis estarem envolvidas no processo, é difícil a separação desta perda magnética em relação às demais.

Define-se como perda interlaminar o acréscimo da perda magnética provocada por correntes induzidas no pacote devido à condutividade elétrica do revestimento, incluindo falhas de isolamento entre lâminas, efeito de rebarbas, efeitos de soldas e efeitos de sistemas de fixação das lâminas no pacote.

O equacionamento das perdas interlaminares é complicado devido às inúmeras variáveis envolvidas. Estudos realizados por Coombs [16] apresentam um modelo matemático, equação (4.1), para o cálculo das perdas interlaminares em lâminas de transformadores. Segundo seu modelo, a perda interlaminar, por ser uma perda dinâmica, varia quadraticamente com a indução B e com a frequência f . Depende também da largura da lâmina W , da resistividade superficial do revestimento ρ_s , da massa específica do material m_v , e da espessura da lâmina d .

$$P_i = k \frac{B^2 \cdot f^2 \cdot W^2 \cdot d}{\rho_s \cdot m_v} \quad (4.1)$$

Para verificar o funcionamento de sua equação, Coombs realizou uma série de medidas em lâminas com diferentes larguras. Como prevê a equação matemática, o aumento da largura da lâmina aumenta a perda magnética do conjunto. A Fig. 4.1 mostra que para ambas lâminas (com e sem revestimento) existe um aumento das perdas magnéticas com o aumento da largura. A lâmina com revestimento apresenta uma influência menor da largura devido à resistividade superficial do revestimento, enquanto que a lâmina nua apresenta um aumento quase linear da perda magnética interlaminar. A equação (4.1) não leva em conta os fenômenos de perda além da isolação entre as lâminas, tornando-a aplicável a casos particulares.

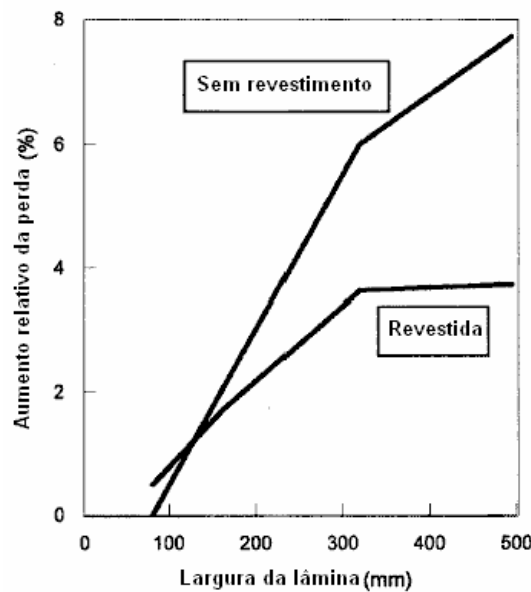


Fig. 4.1 – Variação das perdas magnéticas em função da largura da lâmina [16]

4.1 Metodologia proposta para determinação das perdas interlaminares

Um tipo de ensaio foi desenvolvido com o objetivo de separar quantitativamente os valores de perdas interlaminares. Para a separação das perdas interlaminares P_i dois procedimentos de medida são realizados. Utilizando-se o mesmo pacote de lâminas, medem-se suas perdas em dois casos distintos:

a) Isolação natural, ou seja, utilizam-se lâminas sem isolamento externa adicional, apenas com a isolamento natural das mesmas. A perda magnética medida com isolamento natural é denotada por $P^{isol\ nat}$.

b) Isolação externa, ou seja, utiliza-se entre as lâminas de aço uma isolamento plástica (isolante) formada por uma folha de poliéster de 0,125mm de espessura, por exemplo. Esta folha plástica forma uma isolamento elétrica eficiente, evitando o contato entre lâminas adjacentes, mesmo com a presença de rebarbas. Para este tipo de isolamento, dá-se o nome da perda magnética medida com isolamento externa de $P^{isol\ ext}$.

O objetivo de realizar as medidas isolando as lâminas umas das outras é de inibir as correntes induzidas entre as mesmas. Garantindo que todas lâminas fiquem isoladas eletricamente umas das outras, tem-se a certeza de que não ocorre a perda interlaminar no pacote. Neste caso, a perda interlaminar do pacote pode ser calculada através da subtração da perda medida com isolamento natural e isolamento externa.

$$P_i = P^{isol\ nat} - P^{isol\ ext} \text{ [W/kg]} \quad (4.2)$$

Esta equação só é válida para medidas realizadas sob as mesmas condições de operação, ou seja, mantendo a mesma pressão, indução, forma de onda do fluxo magnético e frequência de ensaio. Nos ensaios realizados, para ambas as situações “a” e “b”, a pressão de aperto dos parafusos foi controlada nos valores de 25, 50 e 75 kgf·cm. O fator de forma da tensão no secundário foi mantido em 1,11, garantindo assim o formato senoidal do fluxo magnético no pacote. As induções escolhidas foram: 0,2T; 0,4T; 0,6T e 0,8T; com todos os pontos de operação na frequência de 60 Hz. Estes pontos de operação foram escolhidos após se ter feito um breve estudo para identificar a região linear de operação do material. Para realizar as medições no mesmo ponto de pressão, o pacote deve ser ensaiado sem parafusos de fixação. Um suporte foi construído especialmente para este fim (ver anexo A), mantendo o pacote montado e alinhado, onde a pressão de aperto pode ser controlada através do aperto dos parafusos do suporte com ajuda de um torquímetro. Este suporte evita também os efeitos internos ao pacote dos parafusos de fixação.

A equação (4.3) será utilizada para calcular a média dos valores medidos para cada conjunto de estatores, expressando o resultado em percentagem. Os indicadores utilizados na equação (4.3) são a variação da perda magnética (ΔPerda), a variação do campo coercitivo (ΔH_c) e a variação do campo máximo ($\Delta H_{\text{máx}}$). Os indicadores serão utilizados ao longo deste estudo no intuito de evidenciar algum fenômeno, comportamento ou desempenho relativos a um núcleo magnético montado.

$$\Delta\text{indicador} = \frac{1}{N} \sum_N \frac{\text{valor}_N^{\text{isol ext}} - \text{valor}_N^{\text{isol nat}}}{\text{valor}_N^{\text{isol nat}}} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (4.3)$$

Para a aplicação deste método de separação das perdas interlaminares foram utilizados nos ensaios os dois grupos de estatores denominados por **N** e **L**:

- a) Grupo **N** – as lâminas destes estatores possuem uma isolamento normal, revestimento **C-0**, ou seja, o óxido resultante do tratamento térmico, também conhecido como “azulamento” (pois a lâmina fica com esta coloração).
- b) Grupo **L** – as lâminas destes estatores foram lixadas para retirar a camada de isolamento natural que possuíam, melhorando desta forma o contato elétrico entre as lâminas, ou seja, são lâminas de aço silício sem revestimento algum.

4.2 Influência dos parafusos de fixação em núcleos laminados

Os estatores dos motores originalmente possuem parafusos de fixação. Constatou-se em ensaios que estes parafusos influenciam a determinação das perdas interlaminares das seguintes maneiras:

- i) Os parafusos causam contato entre a primeira e a última lâmina do pacote, formando assim um caminho fechado para as correntes induzidas.
- ii) Os parafusos provocam curto circuito em algumas lâminas adjacentes, facilitando o caminho para as correntes induzidas interferindo no valor das perdas interlaminares.

Para minimizar a influência nas medições dos fatores externos às perdas interlaminares propriamente dita (isto é, devidas à condutividade elétrica do revestimento),

verificou-se a interferência nas grandezas magnéticas dos parafusos de fixação das lâminas nos estatores. Para tal, foram realizadas medidas em estatores com e sem os parafusos de fixação, mantendo os mesmos pontos de operação (pressão, indução, frequência). Primeiramente foi realizada a comparação com o estator denominado N4 com isolamento normal entre lâminas (revestimento C-0). Os resultados mais importantes estão mostrados na Tabela 4.1 e na Fig. 4.2. A retirada do parafuso diminuiu a perda magnética do pacote entre 2,1% e 1,0% com a variação da pressão de 25kgf·cm até 75 kgf·cm, respectivamente.

Pressões kgf·cm	25	50	75
Δ Perdas	-2,1%	-1,6%	-1,0%
Δ Hc	-2,1%	-1,4%	-0,8%
Δ Hmax	-4,9%	-4,0%	-2,2%

Tabela 4.1 – Diferença entre medidas com e sem parafusos no estator N4 com isolamento natural entre lâminas.

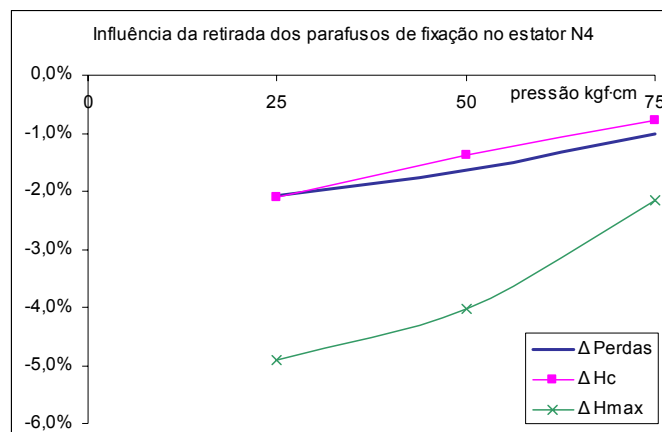


Fig. 4.2 – Diferenças com e sem parafuso no estator com revestimento C-0 (N4).

Se as lâminas forem isoladas entre si não existe contato elétrico entre lâminas, inclusive os contatos provocados pelas rebarbas. Se houver contato elétrico entre lâminas, este será através do parafuso de fixação. Assim, com o aumento da pressão não deve ocorrer uma tendência de diminuição do efeito do parafuso. Neste caso, a pressão não aumenta o contato entre as lâminas por meio de rebarbas, falhas de isolamento e da diminuição da resistência elétrica equivalente do contato por meio do revestimento, ficando apenas a influência do parafuso. Para esta verificação foi realizada a comparação no estator denominado L4 com isolamento externa entre lâminas (lâminas de plástico entre as lâminas de aço). Utilizando-se o pacote com parafuso como referência, os resultados comparativos estão mostrados na Tabela 4.2 e na Fig. 4.2. Sofrendo um menor efeito da pressão, a influência do parafuso na perda magnética foi da ordem de 2,2%.

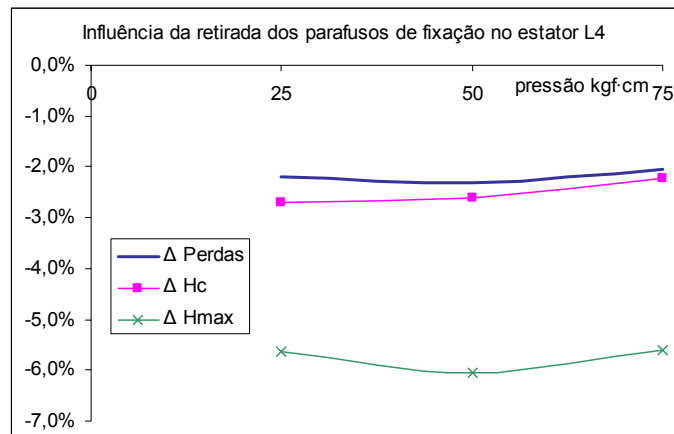


Fig. 4.3 – Diferenças com e sem parafuso, estator L4 com isolamento externa entre lâminas

Pressões kgf·cm	25	50	75
Δ Perdas	-2,2%	-2,3%	-2,0%
Δ Hc	-2,7%	-2,6%	-2,2%
Δ Hmax	-5,6%	-6,0%	-5,6%

Tabela 4.2 – Diferença medidas com e sem parafusos no estator com isolamento entre lâminas (L4).

Para interpretar o efeito dos parafusos de fixação, considera-se que a perda interlaminar nos estatores é causada apenas por dois fatores: o contato entre lâminas através do revestimento e a influência do parafuso. Dois fatos devem ser levados em conta na análise: a pressão interfere na resistência elétrica de contato entre lâminas através do revestimento e, quando o pacote está com isolante entre as lâminas, há somente a influência do parafuso. Isto é constatado na Fig. 4.3 (Tabela 4.2), em que o acréscimo da perda magnética pela influência do parafuso é praticamente constante com a pressão. Na Fig. 4.2 (Tabela 4.1) houve uma maior variação da perda magnética com a pressão, pois aqui a contribuição na variação da perda magnética do contato interlaminar por meio do revestimento em função da pressão está presente juntamente como o efeito dos parafusos. Nos ensaios realizados, o valor da diferença de H_c com e sem parafusos em função da pressão foi praticamente da mesma tendência de evolução e grandeza da diferença das perdas magnéticas. Analisando o indicador $\Delta H_{\text{máx}}$, quando as lâminas são totalmente isoladas por meio do isolante adicional, ele se mantém praticamente constante em função da pressão, em um valor relativamente maior que os outros indicadores (6,1%). Infere-se desta análise que o efeito dos parafusos ocorre preponderantemente no comportamento do campo magnético máximo. A Fig. 4.4 mostra os laços B-H, para medição com e sem parafuso, realizada à 60 Hz e à 0,8T, na pressão de 75 kgf·cm. Percebe-se que a variação

do campo máximo é maior que a variação do campo coercitivo. Assim, o aumento das perdas devido ao efeito dos parafusos se deve em maior grau ao comportamento do campo na região próxima do seu valor máximo.

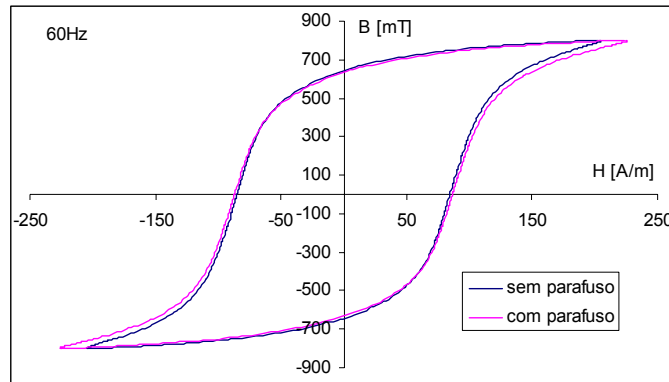


Fig. 4.4 – Laço B-H das medidas realizadas a 60Hz, 0,8T com e sem parafuso no estator L4 com isolamento externo entre lâminas.

4.3 Influência da pressão de fixação das lâminas nos núcleos

A Fig. 4.5 apresenta os valores medidos de perda magnética em [W/kg] no estator L3, em uma frequência de 60 Hz à 0,8 T. Nota-se que o pacote montado com isolamento natural apresenta uma perda maior que o mesmo estator montado com isolamento externo de plástico adicional. Além disso, esta diferença aumenta conforme o acréscimo da pressão (inclinação das retas é diferente).

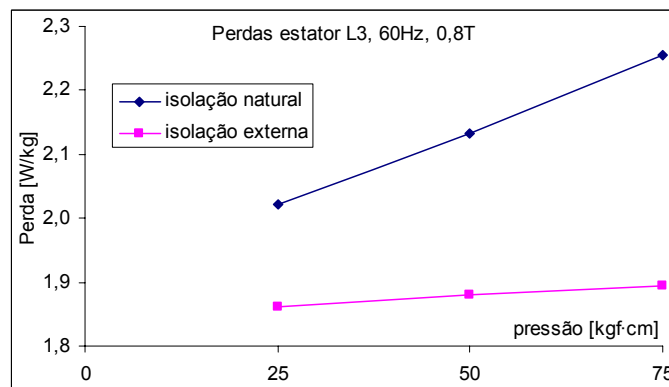


Fig. 4.5 – Medidas das perdas magnéticas no estator L3 com isolamento natural e com acréscimo de isolamento externo entre lâminas.

Quando se está avaliando os estatores em termos das perdas, a pressão de aperto das lâminas é um fator a ser controlado com critério. A Fig. 4.6 apresenta a variação percentual da medida da perda magnética, tendo como referência o valor medido à 25

kgf·cm. No caso do estator montado com isolamento externa adicional, o aumento da pressão acresce a perda por histerese, pois não existe contato entre lâminas de modo que a perda dinâmica não é afetada pela pressão [26].

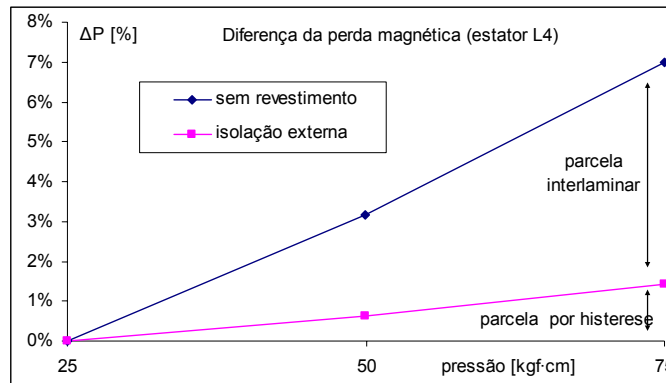


Fig. 4.6 – Comparação da medida da perda magnética em função da pressão, nos casos com e sem isolamento externa.

No caso do estator montado sem a isolamento externa adicional e sem uma isolamento própria, estatores do grupo **L**, a pressão aumenta ambas as parcelas, interlaminar e por histerese. Ou seja, a pressão nas lâminas aumenta o contato entre elas, facilitando a circulação de correntes induzidas entre as lâminas e, conseqüentemente, o acréscimo das perdas interlaminares. Então para se determinar o acréscimo da perda interlaminar devido à pressão deve ser descontado o aumento da perda por histerese.

A Fig. 4.7 mostra os resultados medidos de estatores com e sem revestimento C-0 em função da pressão. Dos ensaios realizados, confirmando o que a literatura diz, a pressão aumenta a perda magnética. Pode-se perceber que o revestimento atenua o aumento da perda magnética com o aumento da pressão. Por exemplo, na Fig. 4.7, para uma pressão passando de 25 kgf·cm para 75 kgf·cm, sem revestimento a perda aumentou em 10% e com revestimento apenas 4%. A inserção da camada de óxido C-0 realmente colabora na isolamento entre lâminas. Acrescentou-se na Fig. 4.7 o ensaio no estator L4 em que se obteve a perda por histerese do mesmo material que compõe o estatores (desconsidera-se o aumento da perda por histerese devido processo de lixar a lâmina) a fim de se ter uma idéia quantitativa da perda interlaminar dos estatores com revestimento C-0.

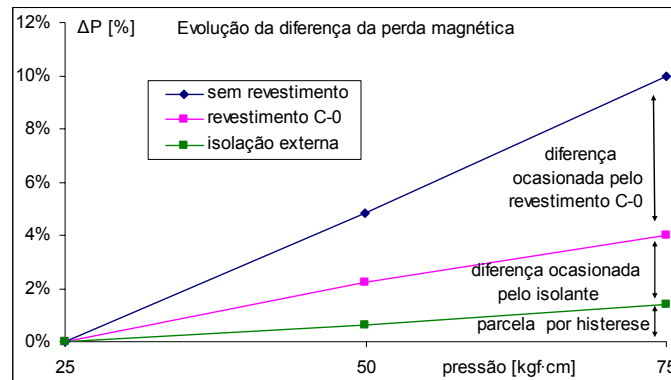


Fig. 4.7 – Comparação da perda magnética em função da pressão em estatores com e sem revestimento C-0

A Fig. 4.8 apresenta a variação da perda magnética, do campo coercitivo e do campo máximo em função da pressão do estator denominado A4 (com revestimento C-0) tomando como referência os valores na pressão de 25 kgf·cm. A pressão de aperto influencia principalmente o valor de $H_{\text{máx}}$ do laço BH (entre 25 e 75 kgf·cm a diferença média é de 9%, enquanto que a perda varia apenas 3,9% no mesmo intervalo). Este resultado mostrado na Fig. 4.8 tem características semelhantes ao estudo do efeito dos parafuso, onde a pressão influencia em menor grau as perdas magnéticas do que o valor do campo magnético máximo. Levanta-se uma hipótese: o aumento do campo magnético máximo não poderia ser causado pela melhoria de contato das rebarbas em função da pressão proporcionando caminhos fechados para correntes induzidas?

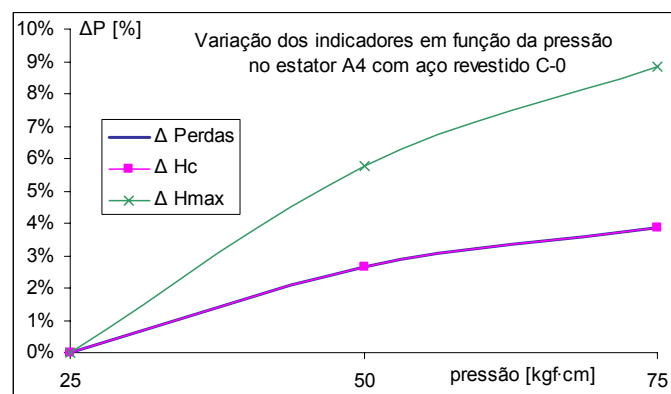


Fig. 4.8 – Variação dos indicadores em função da pressão de aperto das lâminas no estator A4 com lâminas revestidas por C-0

A Fig. 4.9 apresenta o laço BH de um ponto de operação (0.8T, 60 Hz) em função da pressão de aperto dos parafusos. Percebe-se que a variação do campo coercitivo é

menor do que a variação do campo máximo, de maneira semelhante aos efeitos mostrados na Fig. 4.8.

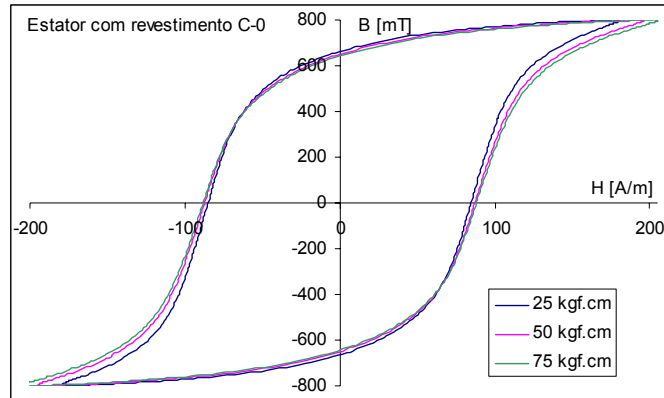


Fig. 4.9 – laços BH do estator com revestimento C-0, em função da pressão, na frequência de 60Hz.

4.4 Medição e análise das perdas interlaminares

4.4.1 Grupo N

Realizou-se as medidas relativas ao grupo N utilizando o estator denominado N3 com revestimento C-0. A diferença média das medidas de perda (em 0,2T, 0,4T, 0,6T e 0,8T) com isolamento natural e isolamento externa adicional está apresentada na Tabela 4.3 e na Fig. 4.10 (a referência é o estator apenas com a isolamento própria ou seja, denominada natural). Estes números mostram que houve uma variação nas medidas, sendo que a separação das lâminas por folhas de poliéster diminuiu as perdas magnéticas do pacote. Neste caso, o valor da variação das perdas (Δ perdas) é a perda interlaminar (conforme equação (4.2)). A pressão tem influência na perda interlaminar, tanto no valor do campo máximo como nos valores de campo coercitivo, os quais acompanham uma mesma tendência de crescimento.

Pressão kgf·cm	25	50	75
Δ Perdas	-1,3%	-2,0%	-3,1%
Δ Hc	-1,8%	-2,5%	-3,4%
Δ Hmax	-0,2%	-1,0%	-3,0%

Tabela 4.3 – Diferenças entre medidas no estator N3 com isolamento natural (C-0) e com isolamento externa (plástico)

A Fig. 4.11 apresenta o laço BH do estator, para os dois casos, com isolamento natural (C-0) e com isolamento externa adicional de plástico. Ambos os laços BH apresentam uma forma semelhante, pois as variações medidas dos indicadores da Tabela 4.3 são relativamente pequenos, da ordem de 0,2% a 3,4%.

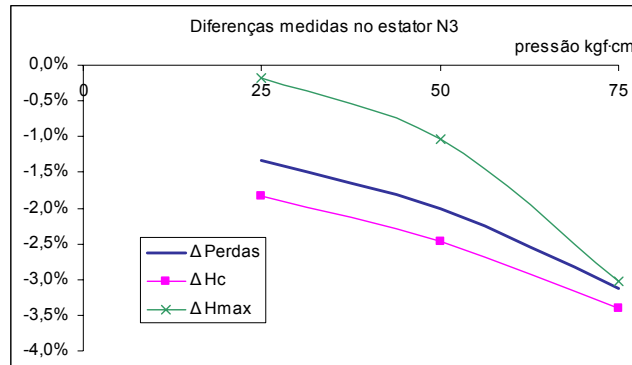


Fig. 4.10 – Comparação das medidas com isolamento natural e isolamento externa estator grupo N

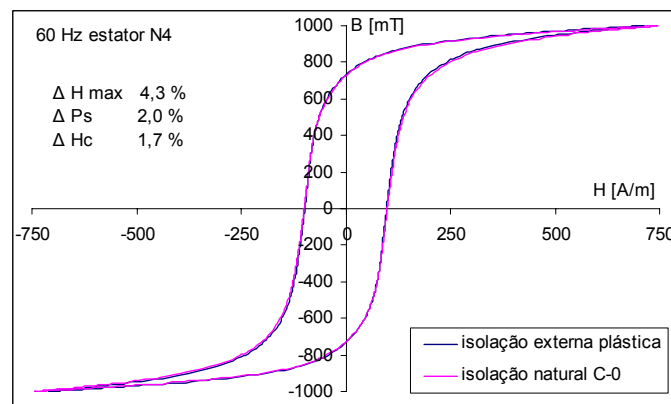


Fig. 4.11 – Laço BH do estator com revestimento C-0 e com isolamento externa a 75 kgf.cm

4.4.2 Grupo L

Outro caso analisado é do estator com lâminas sem revestimento C-0, os quais foram lixadas para retirada desta camada de óxido existente na superfície da lâmina. O objetivo de ensaiar os estatores do grupo **L** é evidenciar o efeito do revestimento (ou a falta dele) nas perdas interlaminares. O estator foi ensaiado sem a presença dos parafusos de fixação, mantendo para cada caso o mesmo ponto de operação (indução de 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8T à frequência de 60 Hz). A Tabela 4.4 apresenta as diferenças medidas no estator denominado L3. Os estatores do grupo **L** apresentam perda interlaminar maior que os do grupo **N** (realizados na seção 4.4.1). Isso ocorre porque no grupo **L** não existe o óxido **C-0** nas lâminas como no tipo **N**, obviamente. A Fig. 4.12 apresenta graficamente a diferença dos valores.

Pressão kgf.cm	25	50	75
Δ Perdas	-7,1%	-10,3%	-13,8%
Δ Hc	-7,2%	-10,4%	-13,9%
Δ Hmáx	-5,4%	-7,1%	-8,9%

Tabela 4.4 – Diferenças medidas no estator L3 sem isolamento e com isolamento externa (plástico)

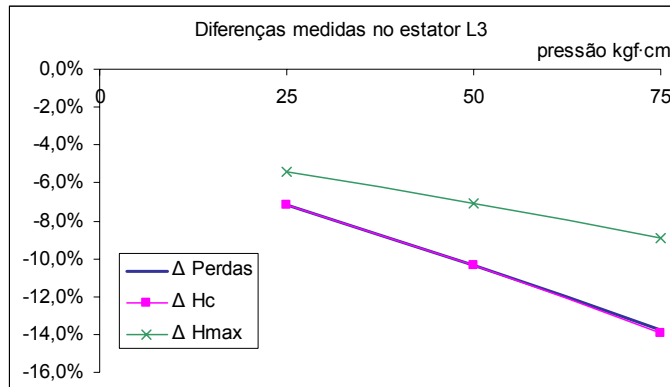


Fig. 4.12 – Comparação das diferenças entre isolamento natural (no caso nenhuma) e isolamento externa no estator grupo L

Estas diferenças mostradas na Fig. 4.12 podem ser verificadas também em uma curva BH. A Fig. 4.13 apresenta os laços para a frequência de 60Hz com isolamento externa plástica e sem esta isolamento adicional. Nesta figura percebe-se que os valores do campo magnético máximo são próximos para ambos os casos, enquanto que os de H_c são diferentes. O valor de H_{max} no caso com isolamento externa é de 698 A/m e de 713 A/m para o caso com isolamento normal. Enquanto que o valor de H_c no caso de isolamento externa foi de 97 A/m e, no caso com isolamento normal, foi de 109 A/m.

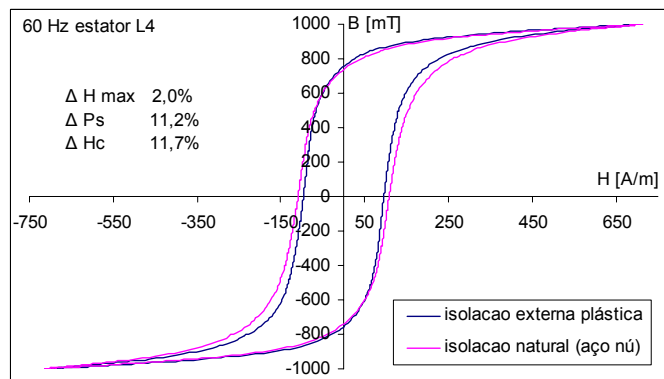


Fig. 4.13 – Laço BH do estator L4 nos casos com e sem isolamento entre lâminas a 1,0 T.

A variação da perda magnética dinâmica clássica pode ser analisada pelo campo coercitivo H_c , o qual deixa o laço “mais arredondado”. A Fig. 4.14 apresenta um outro ponto de operação, onde fica mais evidente a diferença de área de cada laço. Neste caso, o ΔH_{max} é de apenas 8,7%, enquanto que o ΔH_c é de 11,5%.

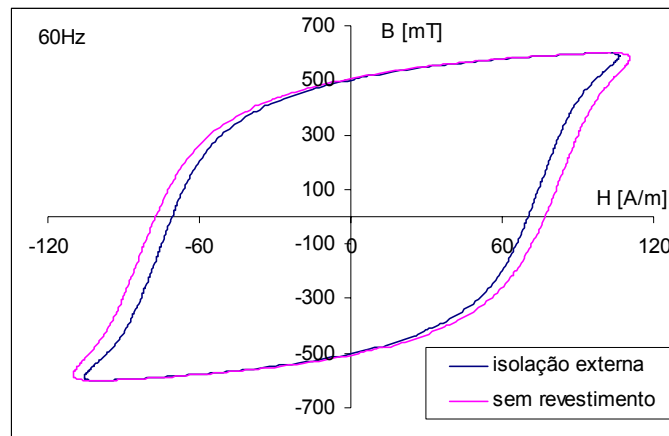


Fig. 4.14 - Laço BH do estator L4 nos casos com isolamento natural e externa entre lâminas a 0,6 T.

Comparando os resultados obtidos para os grupos N (Fig. 4.10) e L (Fig. 4.12), pode-se constatar que a variação da perda magnética interlaminar (ΔPerda) e a variação do campo magnético coercitivo para o estator L3 são praticamente coincidentes, não ocorrendo o mesmo no estator N3. Além do mais, a ordem de grandeza das variações no estator N3 são praticamente quatro vezes menores do que no L3. Isto está indicando que em L3 os efeitos do contato interlaminar é mais evidente do que no N3, onde provavelmente outros fenômenos estejam presentes. Destes resultados de análise, incluindo desde aqueles sobre a influência dos parafusos, percebe-se que a perda interlaminar devido ao contato elétrico entre superfícies de lâminas (mesmo com revestimentos) sofre mais influência no valor de H_c , enquanto que os efeitos dos parafusos provocam na perda interlaminar uma influência no campo magnético máximo de operação.

4.4.3 Medições em baixa frequência para averiguação do método

Um modo de se averiguar a confiabilidade do método de separação das perdas interlaminares é repetir os ensaios com e sem isolamento entre as lâminas, em um ponto de operação onde não existem correntes (ou perdas) interlaminares. Este ponto de operação é possível à 1Hz, pois nesta frequência a perda por correntes induzidas é praticamente desprezível em relação à 60 Hz, por exemplo. Utilizando a bancada de caracterização de materiais desenvolvida no Grucad [27], realizou-se a experiência à 1Hz. Utilizou-se um estator com lâminas sem revestimentos (estator L3), montado com uma pressão de aperto de 75 kgf·cm. Para a facilidade de manuseio, foi confeccionado um cabo especial para

formar as bobinas primárias e secundárias para envolver a seção magnética do estator, descritas no anexo A.

As medidas realizadas são apresentadas na Fig. 4.15, onde percebe-se visualmente que ambas medidas realizadas com e sem isolamento apresentam os mesmos níveis de perda (há uma diferença média entre as curvas de 1,2%). Este mesmo pacote apresentou uma perda interlaminar média de 13,8% na frequência de 60 Hz. A redução de 13,8% para 1,2% ao se reduzir a frequência de 60Hz para 1 Hz mostra que o método pode avaliar as perdas interlaminares.

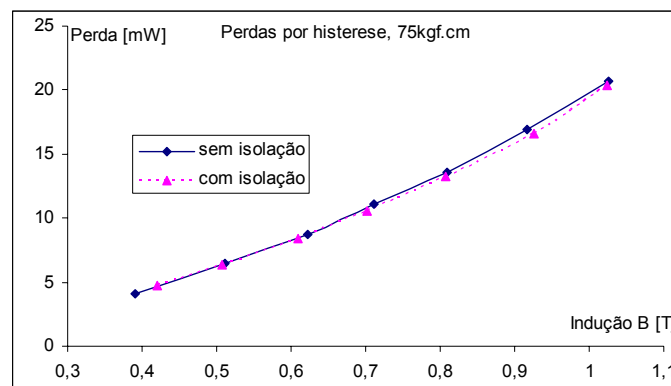


Fig. 4.15 – Perdas medidas à 1Hz com isolamento natural e externa adicional no estator L3

4.4.4 Variação de frequência e indução

Como as perdas dinâmicas dependem do valor da frequência, as perdas interlaminares também sofrem variações ao longo da frequência. Por exemplo, no ensaio à 1 Hz acrescentando a isolamento externa praticamente não houve alteração nos valores da perda magnética. A Fig. 4.16 apresenta o módulo da diferença dos valores medidos no estator com isolamento natural e isolamento externa adicional, para uma pressão de 75 kgf·cm, à 0,8T (a referência utilizada foi o estator com isolamento natural). O valor da perda interlaminar aumenta com a frequência, pois esta é uma parcela da perda dinâmica de um núcleo montado. Deve-se lembrar que após uma certa frequência, o laço BH torna-se “redondo”, não apresentando mais os tradicionais “bicos” no ponto correspondente ao $B_{\text{máx}}$ e $H_{\text{máx}}$. Isto pode ser verificado na Fig. 4.17, onde a partir de 260Hz o ponto de $H_{\text{máx}}$ não coincide com o ponto de $B_{\text{máx}}$, ou seja, o laço BH não apresenta mais os “bicos” no 1º e 3º quadrante. Aproximadamente após a frequência de 260 Hz, a comparação dos valores de $H_{\text{máx}}$ não tem mais sentido dentro do propósito deste trabalho, pois a partir desta frequência o laço BH torna-se oval.

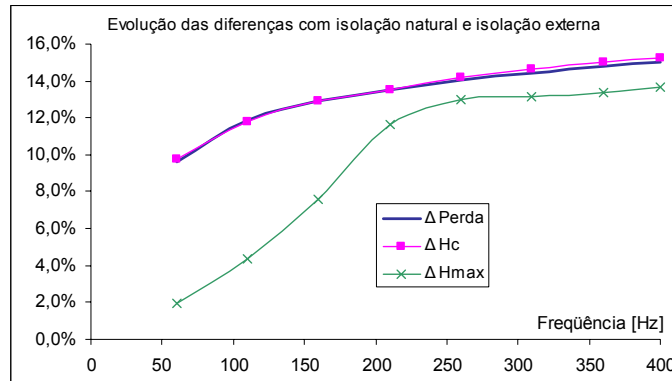


Fig. 4.16 – Variação das medidas em função da frequência, estator L4, pressão de 75 kgf·cm e indução de 0,8T.

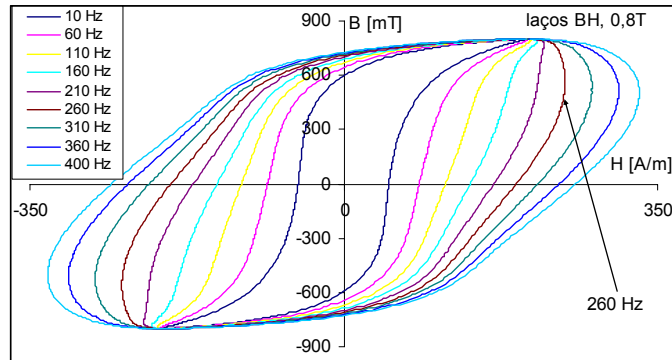


Fig. 4.17 – Laços BH do estator L4, com pressão de 75 kgf·cm, 0,8T nas frequências de 10 Hz a 400 Hz

A Fig. 4.18 apresenta a medição realizada no pacote L3 na frequência de 50Hz com pressão de 75 kgf·cm, através da bancada de caracterização de materiais pertencente ao GRUCAD.

A inserção da isolamento externa elimina a perda interlaminar causada por correntes induzidas. Um dos modelos que pode ser utilizado para representar as perdas por correntes de Foucault interlaminar é dado pela equação (4.1). Como o fenômeno é causado apenas por corrente induzidas, não havendo um fenômeno de magnetização, as perdas excedentes não devem variar. Assim, subtraindo as duas curvas correspondentes às perdas no estator com isolamento natural e com isolamento externa, o resultado são as perdas interlaminares, conforme equação (4.2). Se estas afirmações e modelagens da perda interlaminar são verdadeiras, a tendência da evolução das perdas interlaminares deve satisfazer a equação (4.1), ou seja, a indução deve ter o expoente 2. Na Fig. 4.18 está representada a equação da tendência da evolução da perda interlaminar (P_i). O expoente da indução B nesta equação é de 2,002, confirmando esta abordagem. Estes resultados mostram também que

os experimentos foram realizados praticamente nas mesmas condições (pressão, frequência e indução).

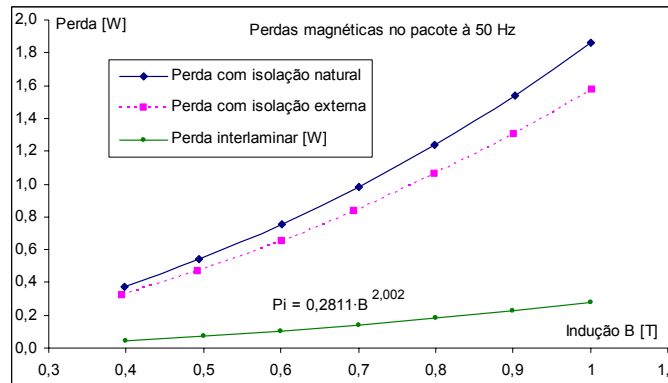


Fig. 4.18 – Variação das perdas medidas em função da indução, medidas no estator L3, à pressão de 75 kgf·cm.

Outros estatores também foram ensaiados com o intuito de examinar a tendência das perdas interlaminares calculadas em função da indução e da frequência. O estator designado pelo número 33 foi ensaiado da mesma maneira que o estator L3. Os resultados estão apresentados na Fig. 4.19. O expoente encontrado para a indução foi de 1,9843 e o expoente encontrado para a frequência foi de 2,008, os quais são resultados satisfatórios.

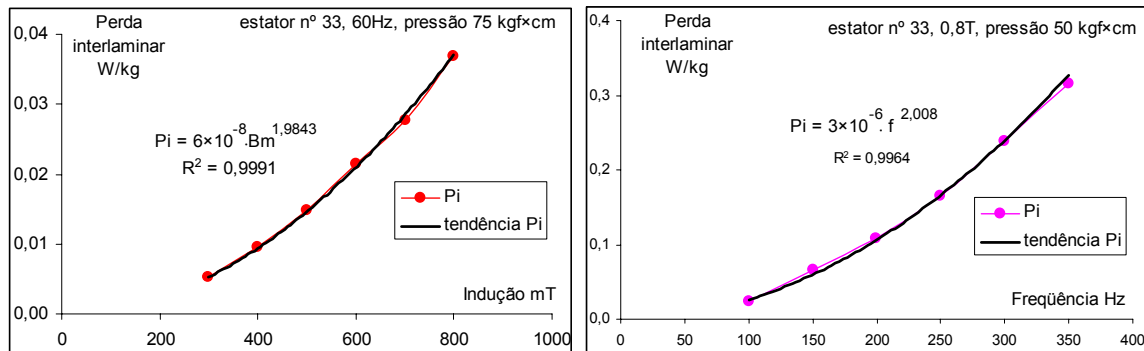


Fig. 4.19 – Perdas interlaminares medidas no estator nº 33, em função da frequência e indução

Devido a dificuldade de realização dos ensaios, principalmente em manter o estator no mesmo valor de pressão durante os ensaios, alguns resultados foram diferentes do esperado. Isso se deve ao fato de que a medição da pressão de aperto das lâminas foi realizada de forma indireta por um torquímetro. A Tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos com o auxílio da curva de tendência do software Excel da Microsoft. A tabela apresenta o expoente da indução B e da frequência f , a variação percentual em relação ao

expoente “2” ($\Delta\%$), o número de pontos utilizados para encontrar a tendência e o valor do coeficiente de correlação R^2 da curva em relação aos pontos medidos (o fator R^2 significa que quanto mais próximo do valor unitário, mais a curva de tendência é próxima dos valores medidos). Foi também calculada a média das diferenças percentuais para os dois expoentes. Ambos apresentaram uma variação pequena (-4,4% e -4,9%) do valor adotado como verdadeiro (o expoente 2).

Estator	Pressão	expoente B	$\Delta\%$	nº ptos	R^2	expoente f	$\Delta\%$	nº ptos	R^2
L4	75	2,1997	10%	4	0,9999	1,8282	-9%	9	1
	50	2,1857	9%	4	0,9994	1,8345	-8%	9	1
	25	1,9143	-4%	4	0,9978	1,8500	-8%	9	1
L3	75	2,0487	2%	4	0,9996	1,8729	-6%	4	1
	50	2,0159	1%	4	0,9998	1,8681	-7%	4	1
	25	1,9687	-2%	4	0,9998	1,8668	-7%	4	1
A4	75	1,6951	-15%	4	0,9991	1,8481	-8%	5	0,9998
	50	1,8040	-10%	4	0,9997	1,8893	-6%	5	0,9995
	25	1,8999	-5%	4	0,9998	2,1068	5%	5	0,9999
N3	75	1,7578	-12%	4	0,9985	1,8067	-10%	5	0,9998
	50	1,8034	-10%	4	0,9968	1,8935	-5%	5	0,9997
	25	1,8113	-9%	4	0,9922	1,9846	-1%	5	0,9997
33	75	1,9843	-1%	6	0,9991	1,876	-6%	6	0,9989
	50	1,6847	-16%	5	0,9977	2,002	0%	6	0,9964
	25	-	-	-	-	2,0145	1%	5	0,9931
Média: - 4,4%				Média: - 4,9%					

Tabela 4.5 – Expoentes da indução e da frequência de vários estatores ensaiados na bancada Brockhaus

4.4.5 Comparação entre alguns estatores

Os estudos realizados anteriormente mostram que as perdas interlaminares dependem do nível de isolamento elétrica entre das lâminas. A Fig. 4.20 apresenta a perda magnética interlaminar de quatro estatores. Dois deles com o mesmo revestimento C-0 (N3 e A4) apresentam uma perda interlaminar na ordem de 0,9% e 3,1% do total das perdas magnéticas do pacote. Os outros dois estatores com lâminas lixadas (L3 e L4), a parcela proveniente das perdas interlaminares está entre 3,5% a 13,8% do total das perdas magnéticas do pacote. A grande diferença encontrada entre os estatores L3 e L4, apesar de pertencerem ao mesmo grupo, pode ser atribuída ao fato de que o pacote L4 sofreu um processo de oxidação natural (ferrugem) por ter sido armazenado desmontado e em local úmido por um certo período de tempo.

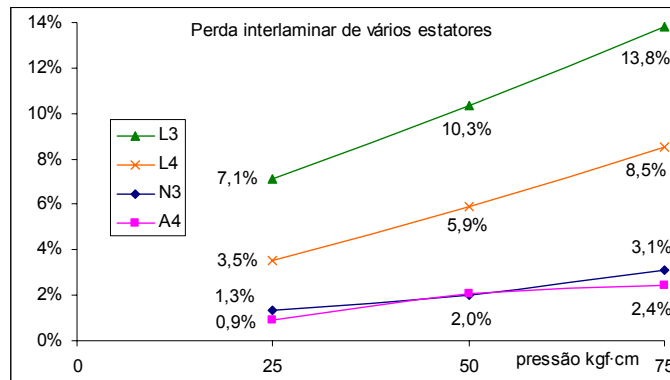


Fig. 4.20 – Comparação da perda magnética interlaminar de vários estatores em função da pressão de aperto

4.5 Considerações finais

No início dos ensaios relativo a este capítulo, muitas tentativas de separações das perdas interlaminares foram mal sucedidas devido à inexperiência e desconhecimento dos fatores a serem controlados durante a realização das medidas. Percebeu-se que os melhores resultados eram aqueles provindos de ensaios rápidos, ou seja, naqueles que não havia tempo de o pacote aquecer (onde foram realizadas poucas medidas). Na medição da pressão através de um torquímetro, após a realização de ensaios na pressão de 75 kgf·cm por exemplo, percebia-se que a pressão do sistema sofria uma pequena redução para 65 ou 70 kgf·cm. Isso acrescentou incertezas na medição dos valores. Assim, adotou-se a realização dos ensaios em um intervalo menor possível, evitando o “afrouxamento” do pacote. Na maioria dos ensaios foram realizadas apenas 4 medidas na frequência de 60Hz (0,2T; 0,4T; 0,6T e 0,8T) e mais 4 medidas em função da frequência.

Neste capítulo foram abordados fatores que contribuem para a formação das perdas interlaminares em núcleos montados. Primeiramente foi visto na literatura que quanto mais larga a lâmina, maior é a perda magnética relativa do pacote. Nos estatores disponíveis para a realização das medidas, todos possuíam as mesmas dimensões físicas, não sendo possível realizar experimentos para verificar a influência da largura nas perdas interlaminares.

Os parafusos de fixação do estator influenciam no desempenho do mesmo, aumentando as perdas magnéticas do pacote de forma a afetar o laço BH nas regiões de indução e campo máximos, tornando as curvas mais pontiagudas. Com os parafusos o pacote exige um campo magnético máximo maior para operar em um mesmo valor de

indução. O indicador mais sensível a este fenômeno para nos ensaios realizados foi o $\Delta H_{\text{máx}}$.

A pressão de aperto das lâminas do pacote exerce um aumento tanto na perda por histerese quanto na perda dinâmica. O indicador mais sensível para este fenômeno foi o $\Delta H_{\text{máx}}$.

O revestimento nas lâminas é um dos fatores estudados que mais interferem no valor da perda interlaminar. Para este tipo de fenômeno os indicadores mais sensíveis foram o ΔPerda e o ΔH_c . O laço BH tem uma tendência de ficar “mais arredondado”.

Procurou-se modelar a evolução da perda interlaminar em função da indução, encontrada através da diferença das medidas com isolamento externa e com isolamento natural, através de uma equação semelhante ao cálculo clássico das perdas por correntes induzidas no interior do material. Muitos resultados apresentaram expoente da indução B muito próximo do teórico, tendo um erro médio de -4,4% em relação ao número “2”. Isso é um forte indicativo que as perdas interlaminares são provocadas por corrente induzidas. Algumas melhorias poderiam ser efetuadas no método de determinação das perdas interlaminares e nos procedimentos de ensaio para averiguar se este modelo teórico proposto é válido para vários casos. Seria importante utilizar, por exemplo, equipamentos especiais para medir diretamente a pressão de aperto das lâminas, e que não houvesse interferências de rebarbas.

Foram apresentadas também algumas comparações das perdas interlaminares inerentes a cada pacote ensaiado. A perda interlaminar é muito sensível a todos os fatores, como a pressão, os parafusos e principalmente ao revestimento. A simples presença de oxidação natural na lâmina nua já foi suficiente para criar isolamento capaz de reduzir as perdas interlaminares.

5 Análise do efeito das rebarbas no desempenho magnético

Como foi visto, as rebarbas e outros efeitos que promovam o contato entre lâminas afetam as características eletromagnéticas do circuito magnético, causando perdas interlaminares através da circulação de correntes induzidas entre as lâminas [16, 23]. As rebarbas podem criar caminhos sólidos entre duas ou mais lâminas, aumentando a quantidade de caminhos possíveis para as correntes induzidas fluírem em um pacote montado. Uma maneira possível de representar o efeito das rebarbas nas lâminas seria através de anéis de curto-circuito (também conhecido como espiras de sombra) inseridos entre algumas lâminas. Considerando um grupo de 4 lâminas, e que todas possuam um nível de rebarbas em que ocorra contato elétrico, pode-se imaginar um dos caminhos sólidos circundante ao conjunto de lâminas representado na Fig. 5.1 pela linha pontilhada, como também entre cada lâmina adjacente. Os caminhos alternativos para as correntes induzidas podem ocorrer entre duas ou mais lâminas, em parte ou em toda a profundidade z da lâmina.

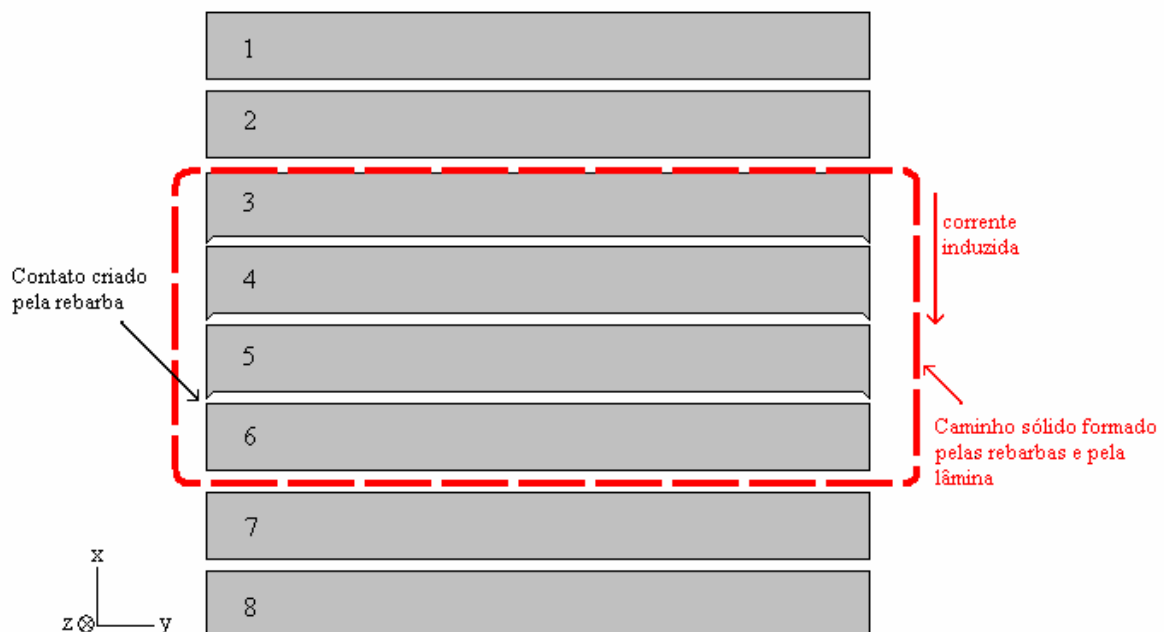


Fig. 5.1 – contato entre lâminas ocasionado pelas rebarbas.

A partir de uma situação ideal em que as rebarbas provocam um curto-circuito envolvendo algumas lâminas, ou seja, um anel de curto-circuito envolvendo as lâminas,

pode-se realizar uma modelagem do fenômeno e realizar ensaios para estudo do mesmo. A corrente induzida no anel cria um fluxo contrário ao fluxo de excitação, opondo-se ao fluxo principal, forçando esta a contornar o anel por um caminho de menor relutância magnética, e conseqüentemente modificando o valor instantâneo de indução de cada região em questão.

Serão apresentados dois estudos do efeito dos anéis, um através de simulação numérica, e outro, com a construção de um protótipo para medição das grandezas envolvidas.

5.1 Abordagem baseada em simulação numérica utilizando o MEF

Para estudar os fenômenos que ocorrem no material magnético, considerando suas propriedades não lineares, ou seja, o fenômeno da saturação, juntamente com os anéis de curto circuito, foi realizado uma simulação numérica utilizando o “software” EFCAD desenvolvido no GRUCAD. Este programa numérico calcula campos através do Método de Elementos Finitos - MEF. A simulação foi feita em duas dimensões (2D). A Fig. 5.2 apresenta um corte no plano x - z , onde pode-se visualizar os condutores (em vermelho) representando a espira de curto-circuito (uma entra e outra sai do plano x - z). A profundidade y da peça é informada ao software para ser possível o cálculo da indução, resistividade e corrente que atravessará a espira. A Fig. 5.3 apresenta o diagrama de ligação dos condutores no software. Dois condutores são conectados entre si nas extremidades por uma resistência e uma indutância de ligação (cujos valores são dados de entrada para cada exemplo simulado). O valor da fonte externa V é igualada a zero e o valor da resistência externa R_{ext} é de $1\text{ M}\Omega$ para representar um circuito aberto. Assim, pode-se calcular a tensão induzida na espira, através da equação (5.1).

$$f.e.m. = n \cdot \frac{d\phi}{dt} \text{ onde } \phi = B \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot S \quad (5.1)$$

Desta forma, desenvolvendo a equação (5.1), a tensão de pico induzida na espira é dada por (5.2)

$$f.e.m. = n \cdot B \cdot S \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \quad (5.2)$$

Para o caso estudado considerou-se o valor de $n = 1$ (simulação de apenas uma espira). O valor da indução escolhido para análise foi $B = 0,925 \cdot \sin(\omega t)$ T e a frequência de operação f de 50 Hz. A área das lâminas envolvidas pela espira S é de 60 mm^2 (4 lâminas x 0,5 mm de espessura x 30 mm de largura), ou $60 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$. Logo o valor da tensão de pico induzida f.e.m. é de 17,4 mV. Neste cálculo, considera-se a indução no material distribuída de forma homogênea, como se o anel de curto circuito não estivesse conectado (de forma a não dificultar a passagem do fluxo).

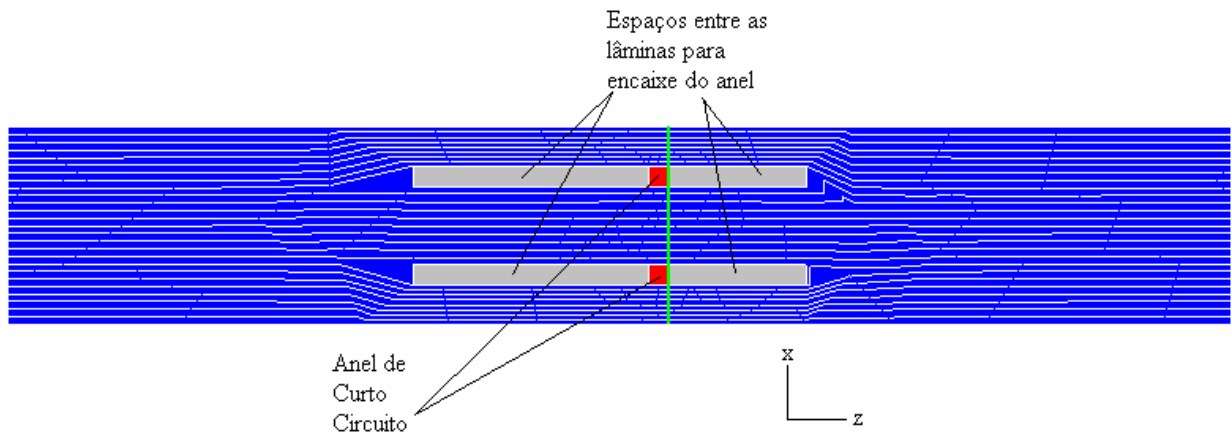


Fig. 5.2 – Simulação realizada no EFCAD

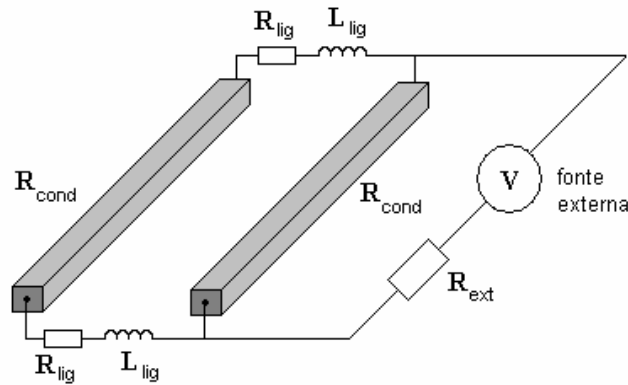


Fig. 5.3 – representação dos condutores maciços no EFCAD

O valor da resistência total da espira pode ser estimada através do cálculo com os valores de condutividade σ do material (cobre) e suas dimensões. A equação (5.3) expressa a resistência para um condutor, considerando seu comprimento $\ell = 0,03\text{m}$, sua área $S_{\text{cond}} = 0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2 = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ e a condutividade do cobre de $5 \cdot 10^7 [(\Omega \cdot \text{m})^{-1}]$. A resistência de cada condutor (meia espira) é de $R_{\text{lcond}} = 2,4 [\text{m}\Omega]$. Considerou-se a

resistência de ligação entre os dois condutores de 2 [mΩ]. Finalmente, somando todos os quatro segmentos (dois condutores e duas resistências de ligação), tem-se o total de 8,8 [mΩ]. As indutâncias de ligação L_{lig} foram desconsideradas.

$$R_{lcond} = \frac{\ell}{\sigma \cdot S_{cond}} \quad (5.3)$$

Com o valor da tensão induzida e da resistência total da espira, pode-se calcular a corrente induzida através da lei de ohm $V = R \cdot I$. O valor de corrente encontrado é de 1,97 [A] (valor de pico). Comparando os valores obtidos da simulação no EFCAD com os valores estimados por meio do cálculo, eles são próximos entre si, com uma diferença em torno de 4%, conforme mostra a Tabela 5.1.

	Calculado	Simulado	Diferença (Simulado como referência)
Tensão induzida	17,4 mV	16,7 mV	4,2%
Corrente induzida	1,97 A	1,90 A	3,7%

Tabela 5.1 – valores de tensão e correntes induzidas na espira de curto circuito em aberto.

A Fig. 5.4 mostra a distribuição em um instante de tempo das linhas de fluxo magnético em um corte no eixo “x” (vide Fig. 5.2). Neste instante, as linhas de fluxo tendem a percorrer um caminho que não passa pelo interior da espira, sendo o fluxo no interior ($B \approx 0,7$ T) menor que o da região externa à espira ($B \approx 1,15$ T), enquanto que em uma seção do circuito magnético sem a presença de anéis de sombra a indução é de 0,925T.

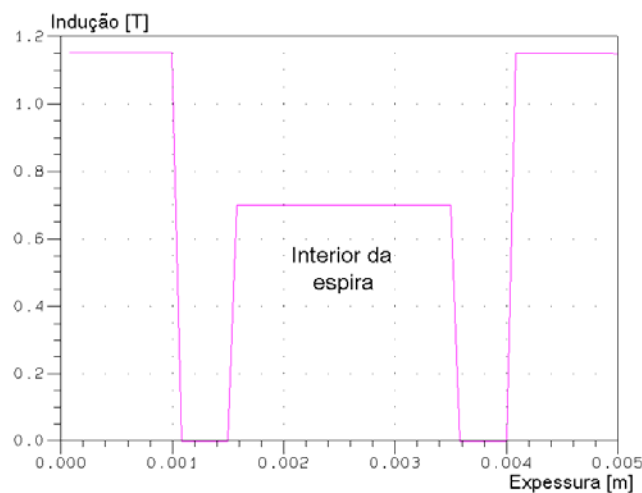


Fig. 5.4 – Distribuição da indução magnética na seção onde está inserida a espira

5.2 Análise de laços BH sob efeito de anéis de curto-circuito

Montou-se um dispositivo protótipo para medição do desempenho de um núcleo magnético com e sem anel de curto circuito. A partir de ensaios no protótipo, formas de onda e outros parâmetros puderam ser obtidos e analisados para auxiliar no entendimento dos fenômenos envolvidos. Foi construída uma estrutura semelhante ao quadro de Epstein, com as mesmas dimensões, composto por oito lâminas em cada braço. O enrolamento primário de excitação foi construído com 700 espiras ao redor de um dos braços, e o enrolamento secundário (sensor de fluxo) de 300 espiras foi alocado no braço paralelo. O dispositivo não possui bobina de compensação do fluxo disperso, como no quadro de Epstein (mais detalhes sobre o fluxo disperso veja no anexo A). O interesse aqui é realizar a comparação de medidas de duas situações, com e sem anéis de curto-circuito, e não de caracterizar o material em si. A Fig. 5.5 mostra o protótipo com um enrolamento terciário de 100 espiras destinado para conexão de uma carga resistiva. O enrolamento secundário serve para se impor a forma de onda do fluxo senoidal.



Fig. 5.5 – Protótipo construído para medição da interferência dos anéis de curto circuito

5.2.1 Estudo dos efeitos dos anéis de curto circuito na situação sem transferência de potencia

Foi inserido um anel envolvendo as lâminas 3, 4, 5 e 6 (veja Fig. 5.1) para a medição de diferenças provocadas pela espira de sombra. Nesta estrutura a influência de apenas um anel é quase imperceptível. Adicionaram-se mais anéis para amplificar os efeitos, como está mostrado na Fig. 5.5. As medidas apresentando diferenças perceptíveis foram as

realizadas com 4 anéis envolvendo as referidas lâminas. Todas as comparações realizadas serão feitas nestas condições de 4 anéis de sombra (4 espiras).

Preparou-se o protótipo previamente, inserindo os anéis de curto-circuito envolvendo as lâminas centrais (3, 4, 5 e 6), deixando-os primeiramente abertos para medição sem os seus efeitos. Após as primeiras medições, os anéis foram cuidadosamente soldados, um a um, fechando os caminhos para correntes induzidas. Neste segundo conjunto de medições, não foi alterado nada no caminho magnético e nem no empilhamento das lâminas. Constatou-se em experiências anteriores que o simples fato de modificar ou simplesmente rearranjar as lâminas do protótipo, as medidas apresentavam diferenças, o que para o objetivo destes ensaios são indesejáveis, falseando a comparação entre os dois conjuntos de medidas.

A Fig. 5.6 apresenta a curva de magnetização inicial obtida no material para ambos os casos, com e sem anéis. Observa-se na figura duas regiões distintas, antes e depois da saturação. Na região antes da saturação, existe uma diferença entre as curvas. É necessário uma corrente de excitação maior no enrolamento primário para fornecer o mesmo valor de indução no material quando os anéis curto-circuito estão presentes. Após o joelho das curvas, ambas convergem para uma mesma assíntota.

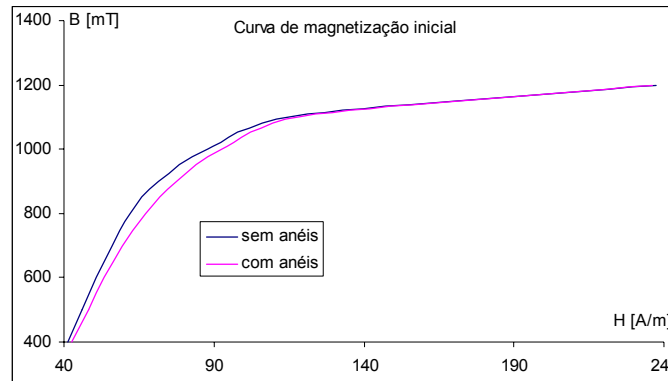


Fig. 5.6 – Curva de magnetização inicial medida no material com e sem anéis de curto circuito.

Alguns parâmetros foram devidamente escolhidos para monitorar o efeito dos anéis. A Fig. 5.7 apresenta valores relativos em função da indução de perda magnética total (ΔP_s), campo coercitivo (ΔH_c) e campo magnético máximo ($\Delta H_{m\acute{a}x}$), calculados através da equação (5.4), onde V representa o valor da grandeza em questão.

$$\Delta V = \frac{V_{com_anel} - V_{sem_anel}}{V_{sem_anel}} \cdot 100 \quad (5.4)$$

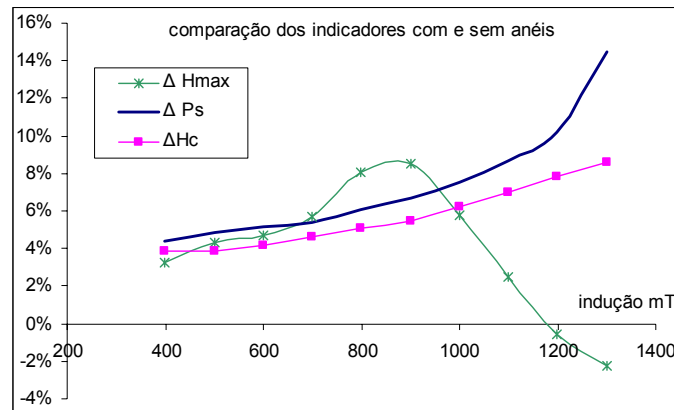


Fig. 5.7 – Comparação dos valores medidos no material com e sem anéis de curto circuito.

Os valores da perda magnética e do campo coercitivo aumentam em uma tendência semelhante em função da indução imposta pelo controle do fluxo no enrolamento secundário. O aumento do campo coercitivo é praticamente proporcional com o aumento da perda magnética, deixando o laço BH mais arredondado. O comportamento da evolução do campo magnético máximo ($\Delta H_{m\acute{a}x}$) em função da indução apresenta uma tendência não tanto correlacionada com a evolução da curva da perda. Nesta estrutura estudada, os valores da variação do campo máximo crescem rapidamente a partir de uma indução de 0,6T, e após uma indução de 1T seus valores decrescem rapidamente. No momento em que o material começa a saturar (por volta de 0,9T), e sua permeabilidade começa a diminuir, o $\Delta H_{m\acute{a}x}$ deixa de aumentar e o efeito do anel de curto-circuito não é mais percebido através deste parâmetro. Note que na região de 0,8 a 0,9 T onde o material tem seu o valor máximo de permeabilidade o valor de $\Delta H_{m\acute{a}x}$ é maior. Este é um fato importante: o efeito de anéis de curto-circuito na evolução do campo magnético máximo ocorre em uma região específica, que no caso desta estrutura está entre 0,7T a 1,0T.

A Fig. 5.8 apresenta a curva da permeabilidade relativa equivalente do circuito magnético pertencente ao protótipo, onde pode-se verificar que a partir de 0,8T o material começa a saturar.

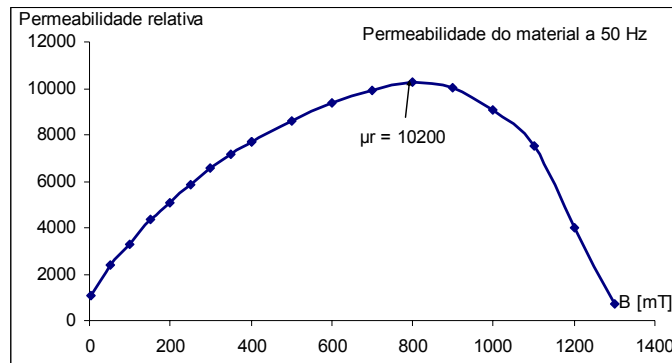


Fig. 5.8 – Curva de permeabilidade do material magnético do protótipo

Por meio da análise de diferenças de laços BH de ambos os casos se pode explicar o aumento da perda magnética com a diminuição do $\Delta H_{\text{máx}}$ conforme apresentado na Fig. 5.7. Através da forma do laço BH se percebe onde ocorrem as modificações ocasionadas pela inserção dos anéis de curto-circuito ao redor de algumas lâminas. A sequência das Fig. 5.9, Fig. 5.10 e Fig. 5.11 apresentam a forma do laço BH na frequência de 50 Hz para valores diferentes de indução. A diferença principal está no 1º e 3º quadrante, onde a trajetória do “bico” do laço é modificada (a Fig. 5.11 está em escala logarítmica para facilitar a visualização). Para o valor de indução até 0,9T, o valor de $\Delta H_{\text{máx}}$ aumenta com a inserção dos anéis. Após este valor de indução, a tendência de evolução deste indicador se inverte (este efeito pode também ser visualizado através da Fig. 5.6). Na Fig. 5.10 e também na Fig. 5.11, a deformação ocorre na trajetória da curva quando está se aproximando do valor máximo (ou mínimo) da indução de operação, até praticamente à indução de 1,0T onde as duas curva tendem a coincidirem. A consequência disso é um aumento da corrente do primário no intervalo relacionado à trajetória do campo quando se tem o anel curto-circuitado.

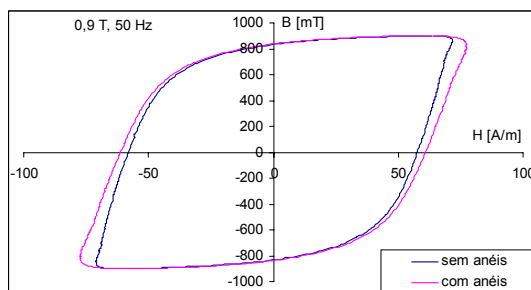


Fig. 5.9 - Laço BH com e sem anéis de curto circuito, indução 0,9T

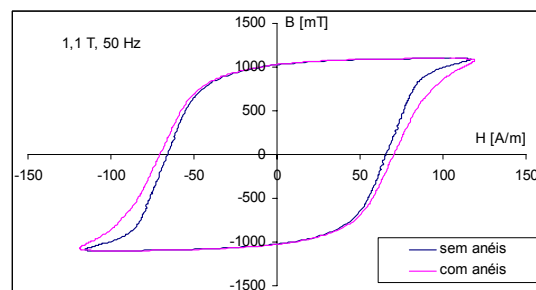


Fig. 5.10 – Laço BH com e sem anéis de curto circuito, indução 1,1T

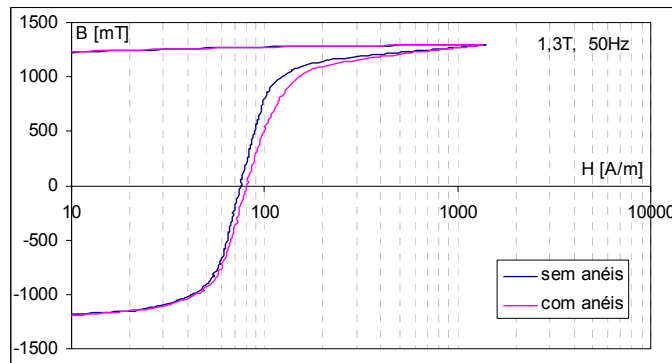


Fig. 5.11 - Laço BH com e sem anéis de curto circuito, indução 1,3T

Ao analisar a tendência das curvas da Fig. 5.7, na indução de 1,3T o valor da perda magnética sofre um acréscimo acima da tendência do campo coercitivo H_c . A Fig. 5.11 mostra as duas curvas com e sem anéis, onde pode-se ver comparativamente que, mesmo sem aumentar o valor de $H_{m\acute{a}x}$ ou de H_c , a área do laço pode aumentar.

O fenômeno de inserir anéis em algumas lâminas poderia ser interpretado como adição de uma carga ativa ao circuito? Aliás, a inserção de um anel não deixa de ser uma espécie de adição de uma carga ao dispositivo, pois o enrolamento primário deverá fornecer uma potência ativa dissipada na resistência elétrica dos anéis. Mas os anéis de curto-circuito afetam de maneira diferente as formas de laço B-H para diferentes induções máximas de operação. Para investigar esta questão de efeito de carga resistiva, foram realizados ensaios com o protótipo inserindo uma carga resistiva ΔP ao enrolamento terciário. A Fig. 5.12 apresenta os laços BH para os vários casos:

- i) Primeiramente tem-se o laço BH do dispositivo original, operando sem anéis nem carga resistiva (curva azul escura, representado na legenda por **ref**).
- ii) Ao se inserir a carga ΔP , houve um aumento na área do laço de forma uniforme, deixando-o mais redondo e modificando mais a região próxima a indução nula ($B=0$), ou seja, alterando o valor do campo coercitivo H_c (curva rosa, representada na legenda por **ref + ΔP**).
- iii) Retirou-se a carga ΔP e inseriu-se os anéis de curto circuito. O laço BH sofreu um pequeno desvio na região em que a indução se aproxima de seu valor máximo (ou mínimo), representado na legenda por **ref + anéis** (curva

alaranjada). Nesta situação, a modificação da região do campo coercitivo foi relativamente menor.

- iv) A curva em azul claro representa o ponto de operação com a carga ΔP (com valor da situação anterior, curva na cor magenta) e os anéis de curto circuito.

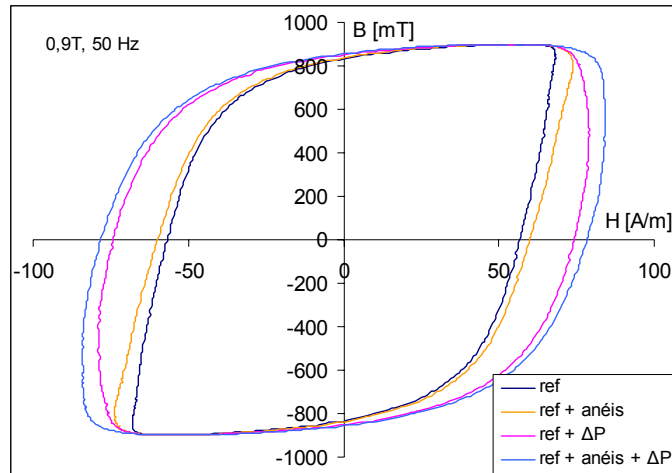


Fig. 5.12 – laço BH com anéis e com uma pequena carga ΔP inserida, a 0,9T

A Fig. 5.13 apresenta os mesmos resultados para um outro ponto de operação, para um valor de indução máxima após o joelho da curva apresentada na Fig. 5.6. A trajetória da curva está mais deslocada e o valor de $H_{\text{máx}}$ não varia muito com o acréscimo dos anéis de curto circuito. Novamente se mostra que o efeito dos anéis de curto-circuito afeta o laço BH na região em que a indução está se aproximando do seu valor máximo (ou mínimo, no 3º quadrante), isto é, onde o laço BH começa a desenhar o “bico”.

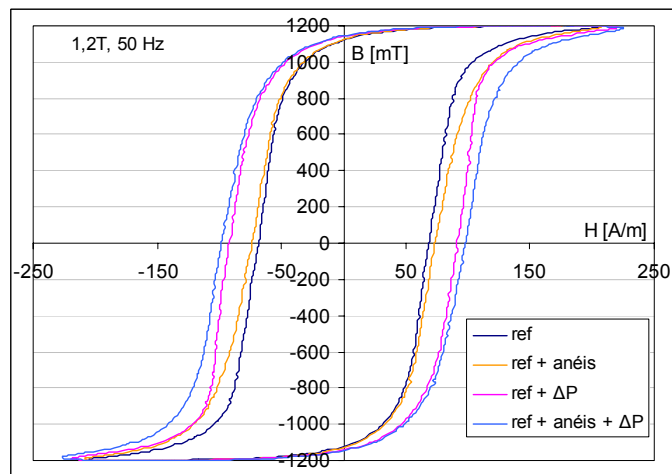


Fig. 5.13 - laço BH com anéis e com uma pequena carga ΔP inserida, a 1,2T

A inserção da carga ou do anel de curto-circuito apresenta fenômenos distintos na forma do laço BH equivalente do dispositivo.

5.2.2 Estudo dos efeitos dos anéis de curto-circuito na situação com transferência de potência

As medições realizadas na seção anterior procuraram representar possíveis efeitos das rebarbas em um núcleo eletromagnético. Agora o objetivo é estudar a influência dos anéis de curto circuito com transferência de energia para uma carga no enrolamento terciário do dispositivo protótipo. Para esta averiguação, foi adicionada no enrolamento terciário (100 espiras) do protótipo uma carga resistiva, com valor suficiente para “arredondar” a forma de onda do laço BH. Um resistor de 30 ohms foi conectado no enrolamento de modo que, da energia total dissipada no dispositivo, aproximadamente 70% seria referente à carga resistiva e os outros 30% referente as perdas de magnetização do núcleo.

Na Fig. 5.14 tem-se o laço BH do dispositivo sem carga (referência, curva em azul escuro) e o laço BH referente ao dispositivo com carga (curva em rosa). Foram então curto-circuitados os anéis das lâminas 3, 4, 5 e 6 de forma a se tentar reproduzir o efeito de rebarbas. Houve um aumento da área do laço, de forma não uniforme, sendo mais perceptível próximo às suas pontas (curva alaranjada). Retirou-se o curto dos anéis e aumentou-se um pouco a carga conectada ao enrolamento terciário de forma a verificar se isto seria semelhante ao fenômeno provocado pelos anéis. Novamente o laço obteve um pequeno aumento de área, porém sua trajetória não é semelhante àquela com os anéis de curto circuito (veja a curva azul clara). Este fato mostra que os anéis de curto circuito não podem ser interpretados somente como mais um acréscimo de carga. Eles provocam um fenômeno diferente no comportamento eletromagnético do dispositivo, desviando o fluxo de algumas lâminas para outras, elevando a indução em uma região mais que em outra (isto já foi verificado e mostrado através da simulação numérica com o EFCAD).

Para deixar o efeito mais perceptível, outro ponto de operação (1,2T) é mostrado na Fig. 5.15 em detalhe. As trajetórias das curvas são diferentes e o mesmo fenômeno foi encontrado. Nesta figura evidencia-se que os anéis de curto circuito aumentam o laço BH praticamente em uma pequena região em que a indução está se aproximando do valor máximo (ou mínimo no 3º quadrante).

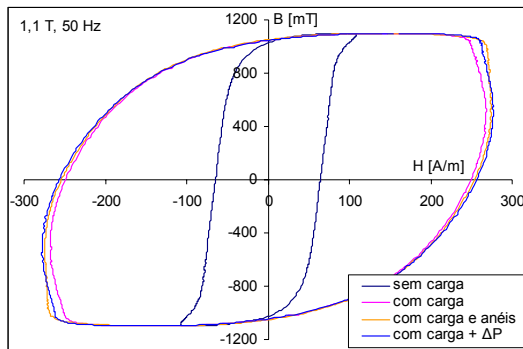


Fig. 5.14 – Laço BH com carga, a 1,1 T

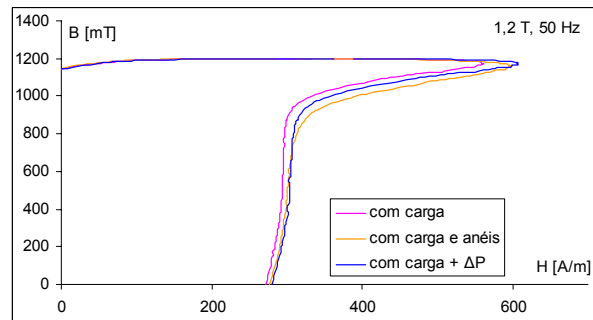


Fig. 5.15 – Laço BH com carga a 1,2T em detalhe

5.3 Análise dos laços BH dos estatores do grupo N e L

Tendo em vista o que foi abordado, achou-se interessante estudar novamente os estatores do grupo N e do grupo L sob este enfoque. A análise dos indicadores Campo Magnético Máximo ($\Delta H_{\text{máx}}$), Perda Magnética (ΔP_s) e Campo Coercitivo (ΔH_c) obtidos dos estatores tipo N e L apresentaram comportamento semelhantes aos encontrados no estudo dos anéis. A medição destes indicadores e do laço BH nos estatores N e L foram realizadas com estator na montagem original, com parafusos de fixação e aperto de fábrica. A Fig. 5.16 apresenta os indicadores em valores percentuais (referenciados pelo estator N), e o valor da permeabilidade relativa no segundo eixo (a referência são os resultados obtidos com o estator tipo N). Percebe-se que o indicador $H_{\text{máx}}$ apresenta valores relativamente altos para indução na região em torno de 0,8T, (quando se têm valores de permeabilidade relativamente altos), antes de iniciar o processo de saturação. Este fenômeno também foi encontrado através da abordagem com os anéis de curto circuito, onde esta diferença máxima de $H_{\text{máx}}$ também coincidiu com um valor máximo de permeabilidade (vide Fig. 5.6 e Fig. 5.8).

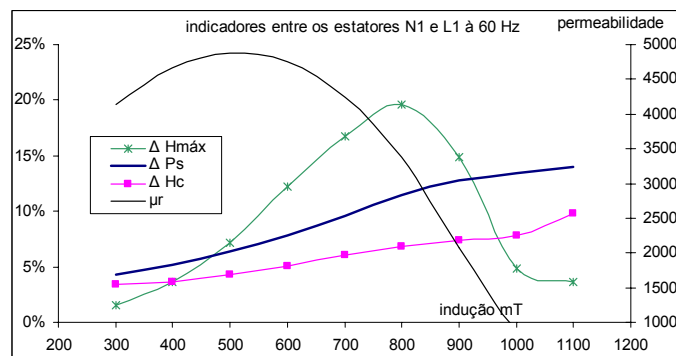


Fig. 5.16 – indicadores relativos dos estatores N e L

A análise do laço BH favorece a visualização do fenômeno de maneira semelhante ao provocado pelos anéis de curto circuito, onde o ponto mais afetado da curva não é o H_c nem o $H_{m\acute{a}x}$, mas sim a trajetória da curva na região em que a indução se aproxima do seu valor máximo de operação. A Fig. 5.17 apresenta graficamente os laços, sendo facilmente perceptível o aumento da área (e conseqüentemente da perda magnética total) sem o relativo aumento dos pontos $H_{m\acute{a}x}$ e H_c . Para este caso com indução de 1,0 T e frequência de 60 Hz, a variação da perda magnética foi de 13,4% enquanto que as variações do H_c e do $H_{m\acute{a}x}$ foram respectivamente de apenas 7,8% e 4,9%. Nesta figura, vários efeitos estão interagindo, como a presença dos parafusos de fixação, o qual já foi mostrado que influencia o indicador $H_{m\acute{a}x}$.

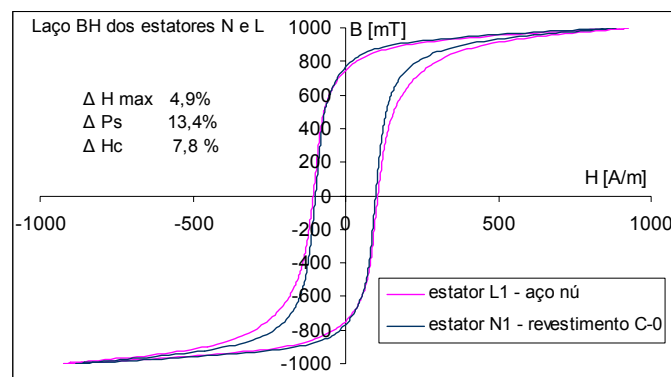


Fig. 5.17 – laço BH do estator N1 e L1, com a presença dos parafusos de fixação do pacote e na pressão original de fábrica

Estes resultados corroboram com a hipótese de que as lâminas sem revestimento entram em contato entre si, formando novos caminhos para as correntes induzidas, de forma semelhante ao explicado na Fig. 5.1. É possível que sem o revestimento o caminho das correntes induzidas interlaminares não passe pelas bordas da estrutura, onde se encontram as rebarbas, e sim pode acontecer internamente entre lâminas adjacentes, dificultando a modelagem matemática do fenômeno.

As experiências montadas com outros estatores permitiram avaliar o formato do laço BH para cada situação de isolamento das lâminas. Para um mesmo estator, onde as lâminas são revestidas com C-0 ou revestidas com uma isolamento externa plástica, praticamente não existem diferenças no laço BH, conforme pode ser verificado na Fig. 5.18. Isso era esperado, pois como já visto anteriormente, o revestimento C-0 mostra-se eficiente na isolamento das lâminas, inibindo grande parte das correntes interlaminares. Também pode-se inferir que possíveis rebarbas neste estator não provocam efeitos de

grade monta, pois a curva BH obtida somente com a isolamento natural (com possibilidade de efeitos de rebarbas) da Fig. 5.18 só tem uma leve não coincidência na região em torno de uma indução de 0,8T.

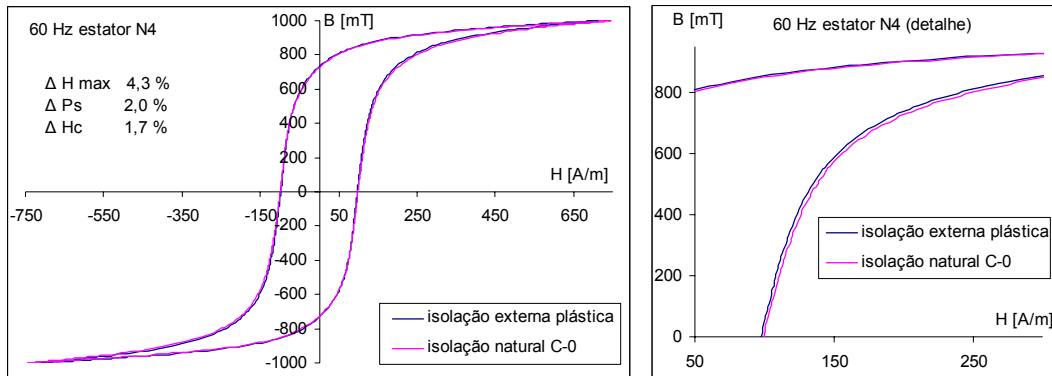


Fig. 5.18 – Laço BH do estator N4 com isolamento C-0 e isolamento plástica externa

Em um outro caso ensaiado, utilizou-se um estator cujas lâminas foram lixadas para retirada do revestimento C-0 (aço nu) comparando-o com o laço BH com isolamento externa de plástico adicional. Os resultados dos ensaios estão mostrados na Fig. 5.19. Neste caso, tanto a perda magnética (P_s) quanto o campo coercitivo (H_c) sofreram modificações de forma proporcional. A inexistência de revestimento entre as lâminas proporcionou caminhos alternativos para as correntes interlaminares, e o laço BH sofreu um aumento de área na mesma proporção que o campo coercitivo. Este resultado é interessante sob o ponto de vista dos efeitos de perdas por correntes induzidas (perdas magnéticas dinâmicas) em relação às perdas por correntes induzidas passando por caminhos alternativos. O pacote com lâminas lixadas tende a ser semelhante a um pacote maciço.

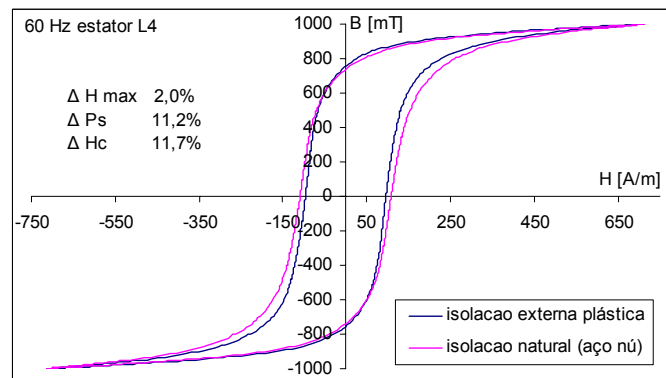


Fig. 5.19 – Laço BH do estator L4 com isolamento natural (lâmina nua) e isolamento externa plástica

O gráfico da Fig. 5.17 é muito semelhante ao da Fig. 5.19, porém existem algumas diferenças significativas. A primeira refere-se a dois diferentes estatores, iguais aos originais de fábrica, com parafusos e pressão padrão de fábrica. O segundo gráfico refere-se ao estator L4 sem parafusos, montado no suporte para realizar as medidas, na pressão de 75 kgf·cm. No primeiro gráfico a variação da perda magnética ΔP_s e do campo magnético máximo $\Delta H_{\text{máx}}$ são maiores, provavelmente pela presença dos parafusos de fixação.

Além da análise do laço de histerese, o qual contempla apenas um ponto de operação, é possível analisar a curva de magnetização inicial, a qual contempla uma quantidade maior de pontos de operação, porém contendo menos detalhes. Como a curva de magnetização inicial é desenhada utilizando-se os pontos de indução máxima ($B_{\text{máx}}$) e campo magnético máximo ($H_{\text{máx}}$), existe uma semelhança desta curva com o laço de histerese, pois é próximo ao joelho da curva que ocorre o fenômeno, conforme Fig. 5.20. Isto também comprova a tendência do indicador $\Delta H_{\text{máx}}$ da Fig. 5.16. Ela indica que por volta de 800 mT ocorre a maior diferença entre as duas curvas, e após este valor, ambas as curvas tendem a se encontrar.

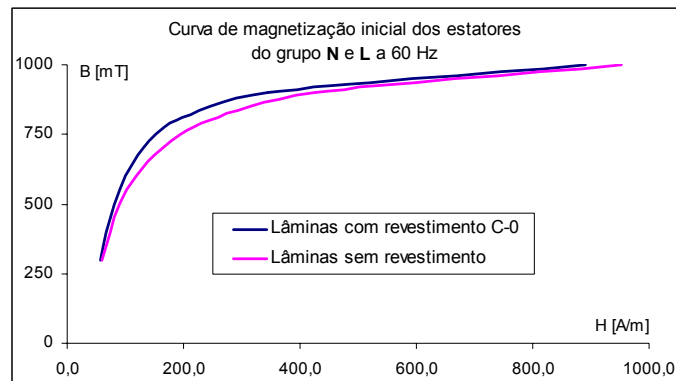


Fig. 5.20 – Curvas de magnetização dos estatores N e L na frequência de 60Hz

5.4 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada a análise do comportamento do material magnético sob a abordagem da representação de possíveis efeitos da presença de rebarbas e do contato interlaminar. Com simulação numérica utilizando o programa numérico EFCAD, mostrou-se a influência dos anéis de curto circuito na distribuição de fluxo na região crítica da estrutura. Pode-se observar que as linhas de fluxo magnético sofrem um desvio na presença dos anéis de curto-circuito.

Uma estrutura magnética foi utilizada como protótipo para medir as perdas magnéticas com a presença de anéis de curto circuito. Na comparação dos laços BH dos ensaios, mostrou-se que os anéis de curto-circuito sensibilizam mais a trajetória da curva na região próxima a indução máxima de operação. A análise dos laços BH mostrou que a inserção de anéis de curto-circuito provoca uma modificação diferente do que a adição de carga ativa. Esta diferença manteve-se presente mesmo com o dispositivo operando com transferência de carga.

O mesmo fenômeno dos anéis de curto-circuito pode ser observado também nos estatores onde o revestimento da lâmina foi retirado. Estes apresentam um comportamento semelhante ao ensaio com os anéis de curto-circuito no dispositivo protótipo. A falta do revestimento cria regiões de contato entre lâminas, deteriorando o desempenho magnético do conjunto. Estas diferenças podem ser visualizadas também através da curva de magnetização inicial comparando estatores com e sem revestimento C-0.

6 Modelagem numérica para estudo dos efeitos de caminhos alternativos para correntes induzidas em núcleos de motores

As lâminas utilizadas para a construção de máquinas elétricas (motores e transformadores) são recortadas no formato do circuito magnético através de um processo de estampagem. Este processo mecânico de corte produz as indesejáveis rebarbas nas arestas destas lâminas, possibilitando a criação de caminhos alternativos para as correntes induzidas, que por sua vez podem aumentar as perdas magnéticas do pacote, afetando o desempenho do dispositivo. O fenômeno do aumento de perdas através deste processo pode ocorrer da seguinte forma: O contato das lâminas adjacentes através das rebarbas cria um circuito com condutividade suficiente para as correntes induzidas circularem. Esse caminho é mostrado em vermelho na figura 5.1 do capítulo anterior.

O fluxo magnético que passa pelas lâminas envoltas deste caminho cria uma força eletromotriz (fem) ao longo do mesmo, que por sua vez, gera uma corrente proporcional a sua resistividade. Isto pode ser representado por uma espira ou um enrolamento ao redor de algumas lâminas adjacentes. Com a circulação de corrente nesta espira, cria-se um campo magnético contrário ao campo principal que passa na espira. Ou seja, haverá uma dificuldade de o fluxo principal passar na seção da espira, pois esta impõe um campo contrário. No exemplo da figura 5.1, o fluxo das lâminas é desviado para as lâminas externas (1, 2, 7 e 8). Este desvio do fluxo acarreta um acréscimo nas perdas magnéticas totais do núcleo, pois para vencer esta barreira, um campo magnético maior deverá ser fornecido pela fonte, como já abordado no capítulo anterior.

O objetivo deste capítulo é a modelagem física e matemática deste problema. Será utilizada uma estrutura magnética como mostrado na Fig. 6.1, a qual é um circuito magnético fechado, sem entreferros. Um conjunto de N_c espiras (pode ser entendida como espiras de curto circuito ou espiras de sombra), com resistência total R_c , estão enrolados em uma parte do núcleo, envolvendo algumas lâminas apenas. O enrolamento N_l impõe a forma de onda do fluxo magnético senoidal no material.

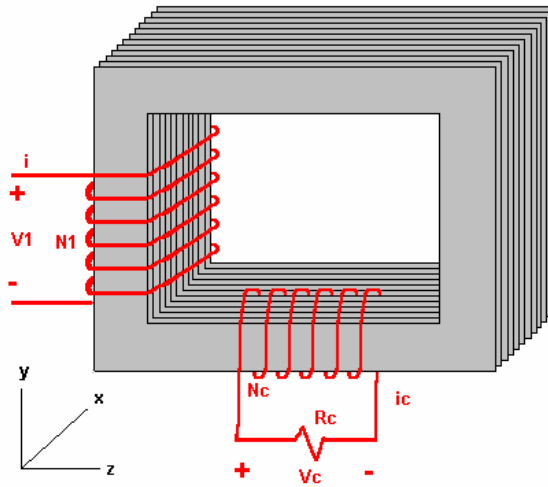


Fig. 6.1 – representação do circuito magnético com espira de Curto Circuito (CC)

Uma vista pela face do lado externo do conjunto é apresentada na Fig. 6.2, por onde o fluxo magnético ϕ divide-se em ϕ_a e ϕ_c nas duas seções S_a e S_c , respectivamente. Como foi explicado, o fluxo ϕ terá uma dificuldade maior em percorrer a seção S_c , e será desviado para a seção S_a . A dimensão ℓ corresponde ao comprimento do caminho magnético fora da bobina N_c , em que o fluxo ϕ está distribuído homogeneamente por toda a seção transversal. O caminho médio magnético total é ℓ_m . Logo, o restante do circuito onde a seção total está dividida pelos dois fluxos ϕ_a e ϕ_c é denominado por ℓ_d , de tal forma que $\ell_m = \ell + \ell_d$.

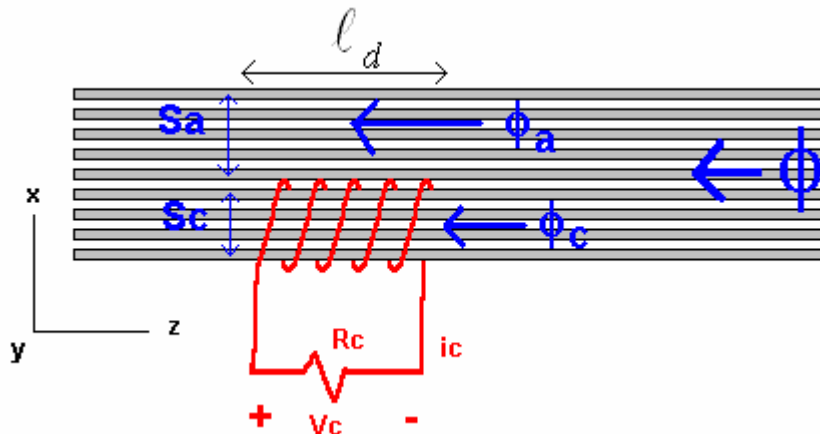


Fig. 6.2 – Vista lateral do circuito magnético, com duas seções: aberta (Sa) e curto circuitada (Sc)

Este problema físico pode ser representado em seu modelo elétrico equivalente (Fig. 6.3) juntamente com as equações matemáticas das suas duas malhas (equações (6.1), (6.2), (6.3)):

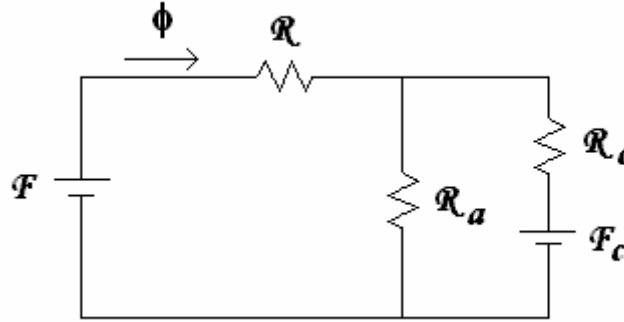


Fig. 6.3 – Circuito elétrico equivalente do circuito magnético com espiras de sombra.

$$N_1 \cdot i_1 - \mathcal{R} \cdot \phi - \mathcal{R}_a \cdot \phi_a = 0 \quad (6.1)$$

$$N_1 \cdot i_1 - N_c \cdot i_c - \mathcal{R} \cdot \phi - \mathcal{R}_c \cdot \phi_c = 0 \quad (6.2)$$

$$\phi = \phi_a + \phi_c \Rightarrow S \cdot B = S_a \cdot B_a + S_c \cdot B_c \quad (6.3)$$

A tensão induzida V_c no enrolamento N_c é dada por (6.4). O fluxo imposto ϕ tem relação com a tensão V_l através da equação (6.5) e a corrente induzida é dada por (6.6).

$$V_c = -N_c \frac{d\phi_c}{dt} = -N_c \cdot S_c \frac{dB_c}{dt} \quad (6.4)$$

$$V_l = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -N_1 \cdot S \frac{dB}{dt} \quad (6.5)$$

$$i_c = \frac{V_c}{R_c} \quad (6.6)$$

A equação (6.5) é válida se a impedância da fonte primária e a resistência do enrolamento primário forem nulas. Isto não é verdadeiro, pois ambos possuem um valor não nulo e, portanto, provocam queda de tensão. Entretanto, o protótipo tem uma malha de realimentação que impõe a forma de tensão no primário para compensar as quedas de tensão da impedância da fonte e do enrolamento (e da indutância de dispersão). Tendo em vista este fato, a tensão V_l da equação (6.5) é aquela aplicada sobre a indutância magnetizante do circuito magnético e não a tensão da fonte em si.

Com o auxílio das relações da Tabela 6.1, substitui-se na equação (6.1) o valor da relutância, resultando em (6.8).

$$N_1 \cdot i_1 - \frac{\ell}{\mu \cdot S} \cdot \phi - \frac{\ell_d}{\mu_a \cdot S_a} \cdot \phi_a = 0 \quad (6.7)$$

Circuito Elétrico	Circuito Magnético
Lei de ohm, $I=V/R$	$\phi = \mathcal{F}/\mathcal{R}$
Resistência, $R = \ell / \sigma \cdot S$	Relutância, $\mathcal{R} = \ell / \mu \cdot S$
Tensão, V	Força magneto motriz, \mathcal{F}

Tabela 6.1 – relação entre grandezas do circuito elétrico e magnético.

$$N_1 \cdot i_1 - \frac{\ell}{\mu \cdot S} \cdot \phi - \frac{\ell_d}{\mu_a \cdot S_a} \cdot \phi_a = 0 \quad (6.8)$$

Como o valor da permeabilidade é dada pela relação $\mu = B/H$ e $\mu_a = B_a/H_a$, reescreve-se a equação (6.8), resultando na primeira equação do circuito magnético referente à malha contendo a relutância \mathcal{R}_a .

$$N_1 \cdot i_1 - \ell \cdot H - \ell_d \cdot H_a = 0 \quad (6.9)$$

Para a equação (6.2), o mesmo procedimento é adotado, resultando na equação (6.10) referente à segunda malha contendo a relutância \mathcal{R}_c .

$$N_1 \cdot i_1 - N_c \cdot i_c - \ell \cdot H - \ell_d \cdot H_c = 0 \quad (6.10)$$

Com as equações (6.9), (6.10) e (6.3) pode-se resolver o sistema calculando cada parcela por meio do seguinte algoritmo:

Inicialmente, em $t=0$, as incógnitas B , H , H_a , H_c , i_l , V_c , i_c são igualadas a zero para a primeira iteração. Como a única variável conhecida é a tensão V_l , a qual impõe a indução B no material, ela é definida previamente para o cálculo das próximas variáveis.

$$V_1(t) = V_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (6.11)$$

Incrementa-se o tempo para início das iterações, $t=t+\Delta t$ e calcula-se as variáveis:

$$B(t) = B(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{N_1 \cdot S} V_1(t - \Delta t) \quad (6.12)$$

$$B_c(t) = B_c(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{N_c \cdot S_c} V_c(t - \Delta t) \quad (6.13)$$

$$B_a(t) = \frac{S \cdot B(t) - S_c \cdot B_c(t)}{S_a} \quad (6.14)$$

Com os valores de indução B no material, pode-se obter o valor do campo magnético H no material. Para este cálculo, podem-se utilizar três métodos:

1 – Fixar o valor da permeabilidade μ correspondente ao B_{\max} imposto, supondo que o material é linear e calcular H através da equação (6.15), onde o inverso da permeabilidade magnética é a relutividade ν .

$$H = \frac{1}{\mu} B = \nu \cdot B \quad (6.15)$$

2 – Utilizar a curva de caracterização inicial do material e extrair o valor da permeabilidade correspondente à indução B , calculando H através de (6.15).

3 – Utilizar um modelo que considera as perdas magnéticas (Jiles-Atherton inverso - JA^{-1} [28]), onde uma sub-rotina fornece os valores de H desejados a partir de um ponto H , B e ΔB fornecidos. Este modelo necessita cinco parâmetros numéricos que representam o laço BH do material.

Os valores de H_c e H_a correspondem ao campo no caminho por onde passa a espira e seu caminho paralelo, no comprimento ℓ_d (veja Fig. 6.2). O campo H é o campo magnético do circuito corresponde ao comprimento ℓ , ou seja, do restante do circuito. O campo magnético total do circuito denominado por H_{tot} é dado por (6.22), o qual depende do valor da corrente i_l proveniente da equação (6.9) (ou também da equação (6.10)).

$$H_a(t) \Leftarrow B_a(t) \quad (6.16)$$

$$H_c(t) \Leftarrow B_c(t) \quad (6.17)$$

$$i_c(t) = \frac{\ell_d \cdot (H_a - H_c)}{N_c} \quad (6.18)$$

$$V_c(t) = R_c \cdot i_c(t) \quad (6.19)$$

$$H(t) \Leftarrow B(t) \quad (6.20)$$

$$i_l(t) = \frac{\ell \cdot H(t) + \ell_d \cdot H_a(t)}{N_l} \quad (6.21)$$

$$H_{tot}(t) = \frac{i_l(t) \cdot N_l}{\ell + \ell_d} \quad (6.22)$$

Volta-se a equação (6.11), incrementa-se o tempo e continua-se o processo até completar o tempo de simulação estabelecido. Como o modelo de (JA^{-1}) inicia com valores a partir do zero, o primeiro período não corresponde ao regime permanente, sendo necessário calcular alguns períodos para haver um regime permanente.

Com o valor de H_{tot} e de B , é possível desenhar o laço BH correspondente ao circuito magnético total.

6.1 Quadro protótipo 105

6.1.1 Construção do protótipo

Construiu-se um quadro de ensaio protótipo para realização das medidas para posteriormente ser possível de comparar com os valores obtidos das simulações do modelo. O protótipo foi construído com aço E230 (nomenclatura da ACESITA), tomando-se o cuidado de não superpor as lâminas nos cantos, evitando o espaçamento entre lâminas existente no empilhamento como é no quadro de Epstein. Dessa forma, ao utilizar lâminas com dimensões de 280 x 30 mm, sem sobreposição, o comprimento médio do caminho geométrico (considerou-se o mesmo valor para o magnético) é de 1050mm, e não mais 940mm (comprimento magnético padrão) como no quadro de Epstein (o geométrico é de 1,0m). Este protótipo é denominado por “quadro 105” em referência ao comprimento de seu caminho magnético. Devido a esta diferente forma de montagem, o circuito magnético apresenta uma relutância maior que o circuito magnético do quadro de Epstein, pois nos cantos há pequenos entreferros, bem como efeitos da anisotropia magnética das lâminas estão mais presentes. O quadro 105 é alimentado por um enrolamento primário de 700 espiras em um dos braços, e o fluxo é controlado por outro enrolamento de 300 espiras no braço paralelo ao anterior. Para realizar as medições de indução em cada uma das seções foram inseridas 2 sondas de tensão formadas por 20 espiras cada na região próxima aos anéis de curto-circuito. Um outro enrolamento, também de 20 espiras, foi inserido envolto da seção S_c , o qual servirá como anel de curto-circuito. O valor da resistência total deste enrolamento foi medida através de um multímetro de precisão, sendo de aproximadamente $R_c=0,57\Omega$. O valor do caminho médio ℓ_d representa o comprimento em que ocorre a separação do núcleo em duas seções, e está melhor representado na Fig. 6.4.

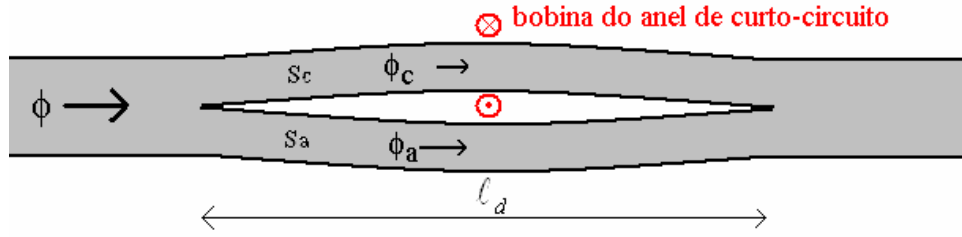


Fig. 6.4 – representação do tamanho ℓ_d em função do empenamento das lâminas ocasionada pela inserção da bobina de CC

Um breve estudo da variação deste parâmetro revelou o seu valor interfere nos resultados simulados, ora diminuindo o efeito dos anéis, ora pronunciando este efeito. A construção do quadro protótipo 105 apresenta um valor de ℓ_d aproximadamente de 20 cm.

6.2 Simulação utilizando o modelo de permeabilidade fixa.

Em um primeiro estudo, as simulações foram realizadas com o valor da permeabilidade fixa em $4350\mu_0$, correspondente à indução de 0,9T (valor de indução escolhido para a realização das medidas) e um campo de 164 [A/m]. Neste caso todas as variáveis possuem formatos senoidais, e o lócus BH resume-se a uma reta.

Na Fig. 6.5a estão apresentadas as formas de onda de campo magnético obtidas para o caso com curto circuito (com CC) e também para o caso em que a espira de curto-circuito está aberta, ou seja, sem curto-circuito (sem CC). Para o caso com curto-circuito, apresenta-se também formas de onda de H_a e H_c (campo magnético na seção S_a e S_c). O campo na seção S_c é menor, pois o enrolamento em torno de S_c produz um campo contrário, dificultando a passagem do fluxo imposto. Desta forma o campo H_a é maior e adiantado no tempo em relação ao campo H_c . Neste caso, com modelo de material linear, percebe-se a mudança de amplitude e de fase dos dois campos.

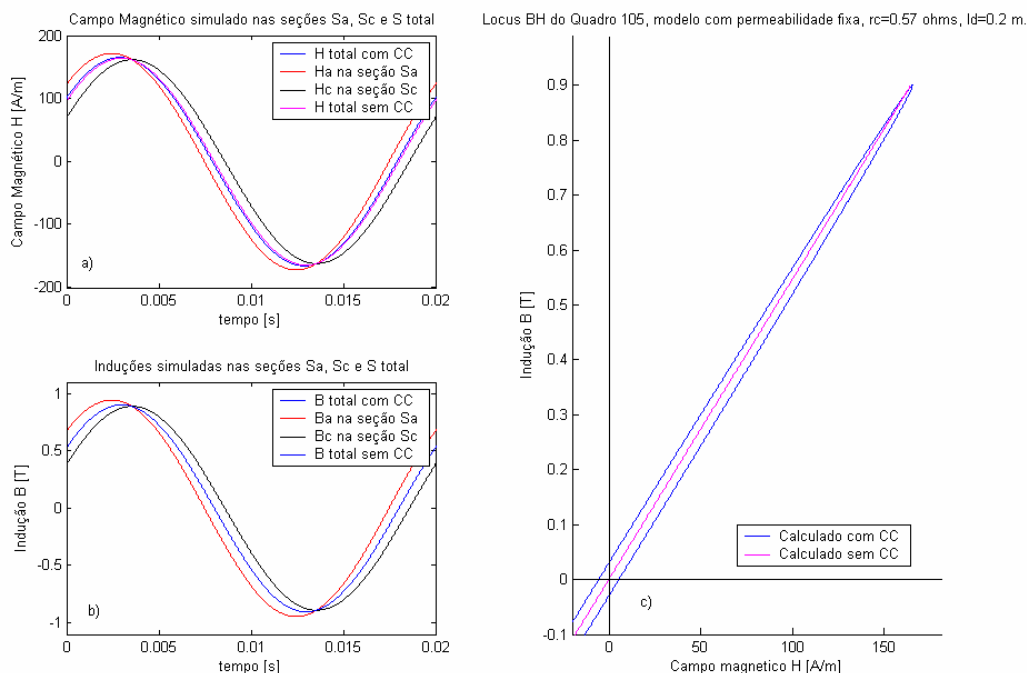


Fig. 6.5 – Valores simulados de campo H , indução B e locus BH para quadro com $l_m=1050\text{mm}$, utilizando uma permeabilidade constante

O mesmo ocorreu para as formas de onda de indução B , B_a e B_c , conforme a Fig. 6.5b. A indução B_a é maior e adiantada em relação à B_c . Como a forma de onda da indução B é imposta no material, esta deve ser a mesma para o caso com e sem curto circuito e as diferenças devem aparecer na forma de onda do campo magnético. Realmente, as induções impostas B para os dois casos estão sobrepostas (curva azul).

Na condição com o curto-circuito há a formação de um laço BH linear e sem área considerável (vide Fig. 6.5c). Verifica-se a influência dos anéis de curto circuito, pois o laço tem uma área e o valor de H_{\max} aumentou.

6.3 Simulação utilizando a curva de magnetização inicial

O segundo modelo utilizado na simulação é com o valor da permeabilidade do material obtida da curva de magnetização inicial para cada ponto de indução B . Com isto, pode-se representar uma não linearidade do material através de uma curva que apresenta saturação (vide Fig. 6.6c). Porém este modelo ainda não representa as perdas magnéticas do material (histerese e dinâmica).

Através das Fig. 6.6a, Fig. 6.6b e Fig. 6.6c, pode-se verificar o comportamento do campo, indução e laço BH , respectivamente. Neste caso, com um modelo de material não

linear, nota-se um efeito maior do curto circuito no lócus BH. Como o material não é mais linear, a forma do campo magnético não é mais senoidal, pois a permeabilidade do material muda em função da indução.

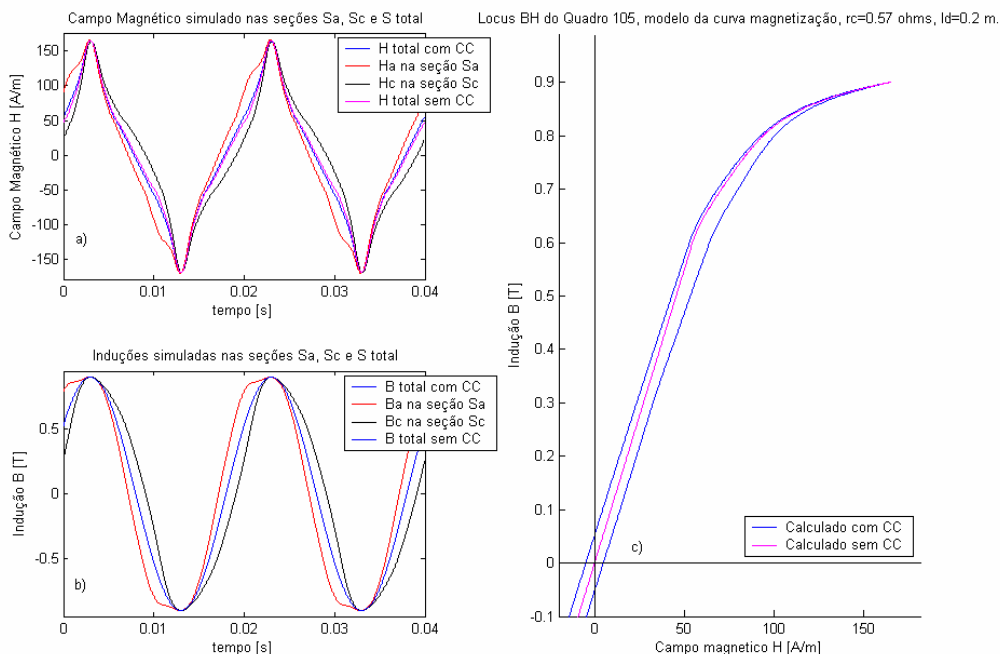


Fig. 6.6 - Valores simulados de campo H , indução B e lócus BH para quadro 105, utilizando a permeabilidade obtida da curva de magnetização inicial de acordo com a indução

A indução total no material permanece senoidal, pois ela é imposta. As parcelas B_a e B_c porém não são mais senoidais, pois o material de cada seção opera em um valor de indução diferente, e conseqüentemente o valor da permeabilidade também é diferente, além de não terem formas de onda senoidais. A soma das parcelas B_a e B_c resultam em uma forma de onda de indução senoidal.

6.4 Resultados utilizando os parâmetros de Jiles-Atherton inverso (considerando o efeito da histerese)

Para uma melhor representação do material, deve-se considerar também o efeito da histerese e das perdas dinâmicas. Um laço BH medido do aço E230 no quadro 105 foi caracterizado através do encontro dos cinco parâmetros do modelo Jiles-Atherton inverso (JA^{-1}) [28]. Através destes cinco parâmetros o material é caracterizado juntamente com fatores construtivos do circuito magnético, ou seja, contemplando também as relutâncias existentes devido a entreferros ou anisotropia magnética. A Fig. 6.7 mostra o laço BH

medido no material E230 do quadro 105 juntamente com o laço BH simulado através do modelo Jiles-Atherton inverso com os parâmetros encontrados. Existe uma dificuldade em encontrar parâmetros que possam representar satisfatoriamente a curva. Por exemplo, na região próxima à indução máxima, as duas curvas não são coincidentes e existe a formação de uma espécie de S na região próxima ao campo coercitivo. Essa dificuldade na caracterização do material proporciona erros entre valores simulados e medidos. Este modelo foi desenvolvido para representar a histerese magnética, e não uma curva BH contemplando perdas dinâmicas. O laço BH da Fig. 6.7 contém, além das perdas por histerese, as perdas dinâmicas. Assim, para outros valores de indução máxima, o conjunto de parâmetros encontrados para o modelo JA^{-1} não serão válidos, resultando um laço BH simulado bem diferente ao laço real. Para contornar este problema, representou-se o material ao longo do comprimento ℓ de uma curva do material E230 obtida no próprio quadro 105, pois esta representa e inclui as **características** deste quadro. O quadro 105 apresenta uma relutância maior nos cantos (devido aos encaixes das lâminas e a anisotropia magnética). Também devido ao relativo baixo acoplamento entre primário e secundário e à falta de bobina de compensação do fluxo disperso, a curva medida é afetada pela influência destes fatores. Para representar o material ao longo do comprimento ℓ_d , onde ocorre a divisão do fluxo total, foi escolhida uma curva de histerese medida no quadro de Epstein, o qual parece ter uma caracterização mais próxima ao **material** em si.

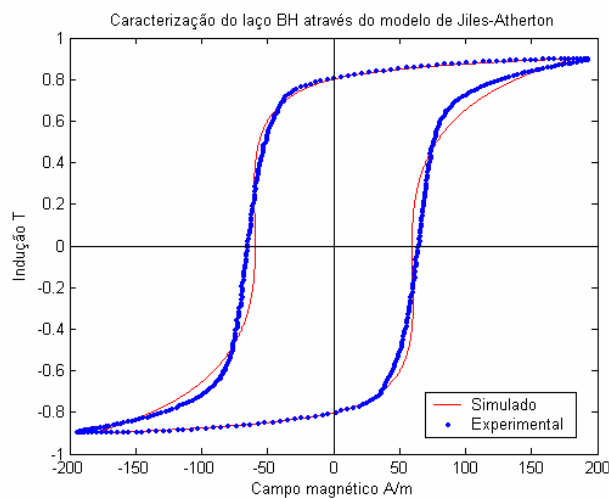


Fig. 6.7 – Representação do laço BH do material E230 no quadro 105.

O quadro 105 utilizado para o experimento possui uma relutância magnética maior que aquela existente no quadro de Epstein, e o aço caracterizado através deste quadro apresenta propriedades diferentes das propriedades medidas através do quadro de Epstein. A Fig. 6.8 compara a curva de magnetização inicial obtida no quadro de Epstein com a do quadro 105, e também com a curva relativa em um quadro 094 (dispositivo que será utilizado em outras simulações e será visto mais adiante). Como o quadro de Epstein possui enrolamento ao longo dos quatro braços do circuito magnético, o fluxo permanece concatenado dentro das bobinas. Isto provavelmente não acontece com os outros dois quadros, pois o enrolamento principal e o enrolamento sensor do fluxo do controlador são constituídos de bobinas em apenas uma parte de um braço.

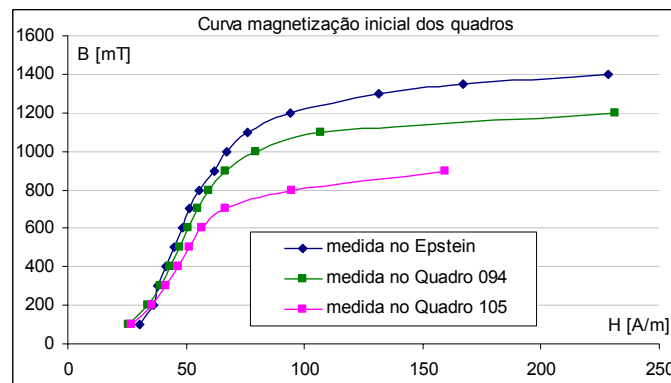


Fig. 6.8 – Curvas de magnetização inicial dos protótipos construídos comparadas como o do quadro de Epstein.

A simulação foi realizada utilizando uma caracterização do quadro 105 para o comprimento ℓ e outra caracterização proveniente do quadro de Epstein para a região de comprimento ℓ_d (conforme mostra a Tabela 6.2). Foi escolhida para cada seção uma curva BH experimental obtida do quadro de Epstein com valores de indução máxima próximos aos valores de B medidos nas seções S_a e S_c . Cada curva resultou um conjunto de parâmetros do modelo JA^{-1} utilizados para a simulação, como pode ser visto na Tabela 6.2.

A Fig. 6.9 apresenta os valores simulados juntamente com a curva BH medida para os dois casos, com e sem anel de Curto-Circuito (CC). Na Fig. 6.9a, apresenta-se as curvas de campo magnético no material em cada seção, tanto para os casos com e sem CC. A Fig. 6.9b apresenta a indução em cada seção, bem como a indução na seção total para os casos com e sem CC. Como a indução na região fora do curto-circuito é imposta, ela é igual no caso com e sem CC. A Fig. 6.9c apresenta o laço BH medido (em pontos) e simulada (em

linhas). Este quadro 105 não apresentou um descolamento muito grande entre os laços BH medidos com e sem CC. Para os resultados de simulação, a diferença foi menor ainda. A representação de fenômenos de anéis de curto-circuito através do laço BH não ficou evidente. Mais adiante será abordada uma outra estrutura onde os efeitos são mais perceptíveis.

Parâmetro JA^{-1}	Seção total - ℓ Quadro 105	Seção $S_a - \ell_d$ Quadro Epstein	Seção $S_c - \ell_d$ Quadro Epstein
ms	$1,0328 \cdot 10^6$	$3,17 \cdot 10^6$	$1,748 \cdot 10^6$
k	88,01	79,97	79,80
c	$237,5 \cdot 10^{-3}$	$214,0 \cdot 10^{-3}$	$251,8 \cdot 10^{-3}$
a	112,1	383,3	78,5
alfa	$367,1 \cdot 10^{-6}$	$357,8 \cdot 10^{-6}$	$168,4 \cdot 10^{-6}$

Tabela 6.2 – parâmetros do modelo de Jiles-Atherton inverso utilizados na simulação.

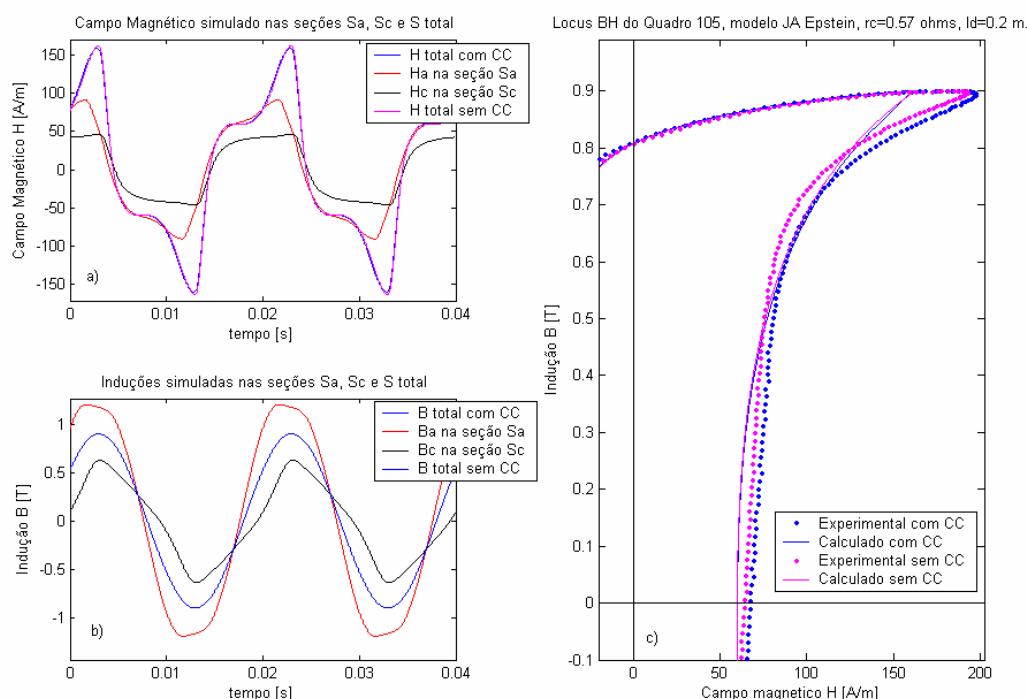


Fig. 6.9 – Valores simulados utilizando parâmetros de Jiles-Atherton

A Fig. 6.10 apresenta uma comparação entre os valores medidos e simulados com os parâmetros de JA^{-1} . Na Fig. 6.10a estão mostradas as curvas da indução medidas e simuladas nas duas seções. A Fig. 6.10b apresenta a forma de onda medida e simulada da

corrente do anel de curto-circuito. Utilizado o modelo de JA^{-1} para representar o material, o formato das formas de onda simuladas está mais próximo das obtidas experimentalmente. Tanto a indução B_a quanto B_c estão de acordo com as medições. Quanto a corrente de curto-circuito, a forma de onda simulada é semelhante tanto em forma quanto em amplitude com a forma de onda medida. Acredita-se que as imperfeições nas formas de onda possam ser atenuadas melhorando a representação dos materiais.

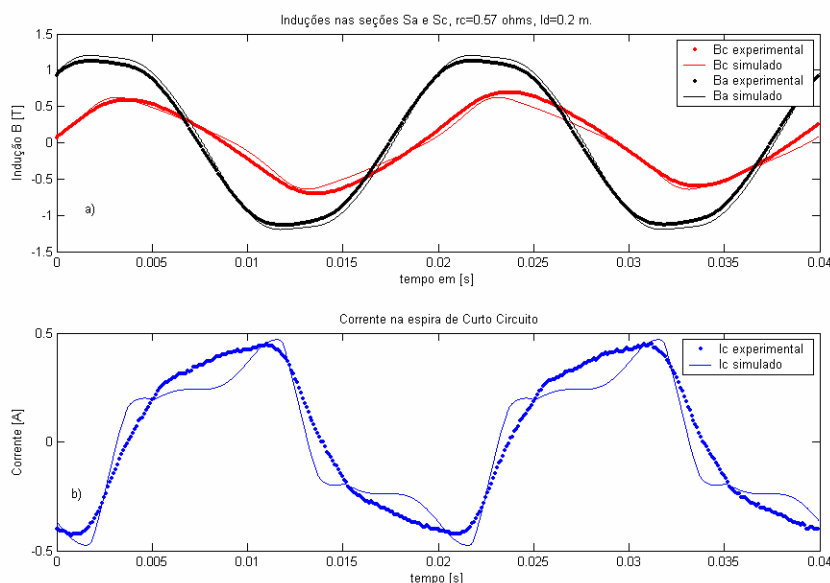


Fig. 6.10 – Comparação dos valores medidos e simulados: induções e corrente no anel de CC.

Os resultados da simulação comparados com a medição no quadro 105 foram satisfatórios, comprovando que o modelo matemático representa o fenômeno físico da inserção de anéis de curto-circuito.

6.5 Quadro protótipo 094

Com o intuito de que os efeitos possíveis anéis de curto-circuito pudessem ser melhor evidenciados, construiu-se um outro quadro protótipo. A diferença com o anterior está na maneira de empilhar as lâminas. Este utiliza a mesma forma que no quadro de Epstein, ou seja, existe uma superposição das lâminas de maneira que ao longo do braço do circuito magnético existe um espaço vazio entre as lâminas. Este quadro 094 (nome devido ao comprimento do caminho médio magnético) foi montado com as mesmas

lâminas E230 utilizados no quadro 105. Os mesmos enrolamentos foram também acrescentados à estrutura magnética.

A Fig. 6.11 apresenta as curvas simuladas e medidas para o quadro 094. Percebe-se com mais evidência uma diferença maior entre os laços BH com e sem anéis de curto-circuito do que as curvas obtidas com o quadro 105. Neste quadro, devido ao empilhamento das lâminas, o fenômeno dos anéis de curto-circuito no laço BH é evidenciado.

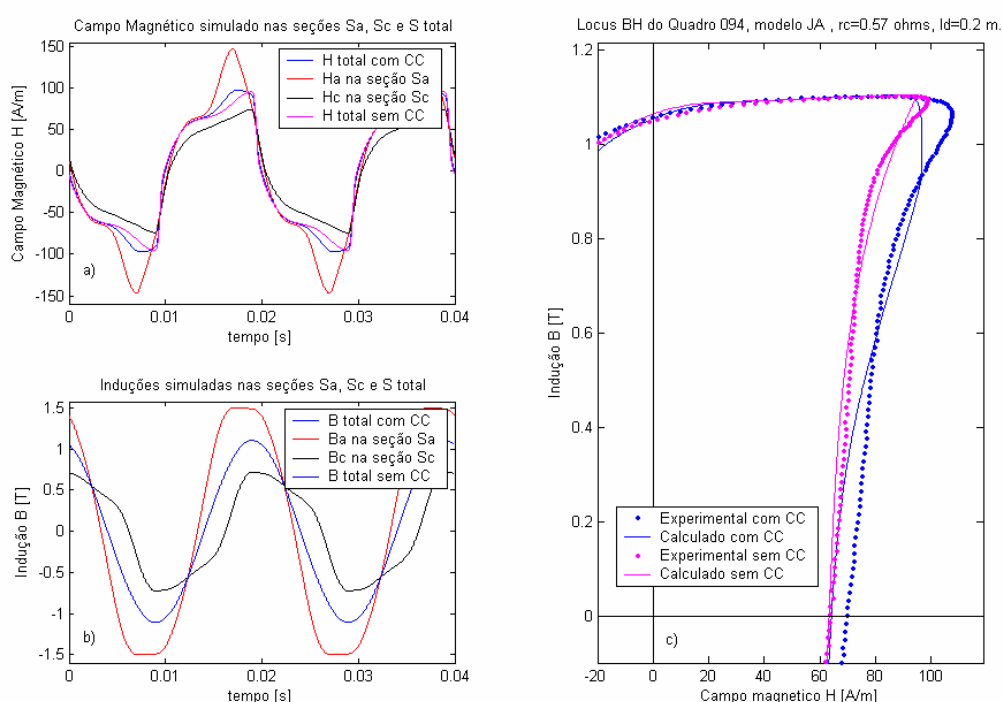


Fig. 6.11 – Valores medidos e simulados utilizando parâmetros de Jiles Atherton no quadro 094

Uma atenção deve ser dada para um detalhe na Fig. 6.11c: Nos laços BH medidos com e sem anéis de CC, o valor de H_c para o laço com os anéis de curto-circuito é maior que o laço sem o curto-circuito. Porém, este aumento de H_c na curva simulada não ocorreu. Provavelmente isto se deve à forma de como está sendo modelado o material, onde no laço BH estão incluídos simultaneamente os efeitos de histerese e das perdas dinâmicas. Talvez resultados melhores possam ser atingidos com modelos utilizando a separação das perdas [27].

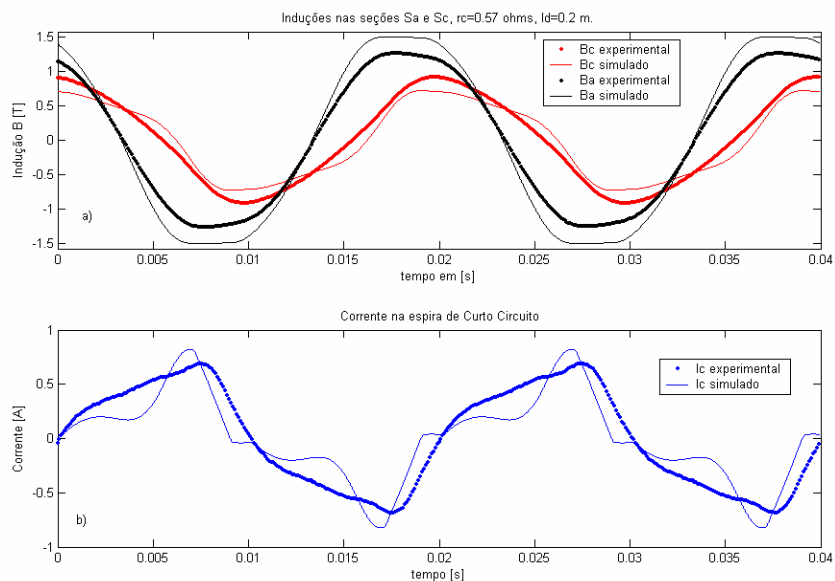


Fig. 6.12 - Comparação dos valores medidos e simulados: induções e corrente no anel de CC no quadro 094.

A Fig. 6.12 apresenta as curvas medidas de indução nas duas seções e da corrente no anel, juntamente com as respectivas curvas simuladas. Os resultados de simulação apresentaram valores maiores que os medidos. Para investigar este fato, resolveu-se inserir uma sonda em cada seção S_a e S_c no braço perpendicular aquele onde estão os anéis de curto-circuito. Se o fluxo nas duas áreas for diferente significa que o fluxo não consegue se homogeneizar ao passar pelo canto. Isto significa que ℓ_d é maior que o definido na simulação, pois o ar entre as lâminas dificulta a distribuição homogênea do fluxo nas lâminas nas regiões não envolvidas pelos anéis de curto-circuito. A Fig. 6.13 apresenta os valores de indução medidos no braço do circuito magnético perpendicular aquele com os anéis de curto-circuito. O fluxo magnético que percorre as 4 lâminas superiores, onde estão inseridos os anéis de CC, não possui o mesmo valor que nas 4 lâminas inferiores, onde não existe o curto-circuito. Portanto o fluxo permanece maior na região correspondente à seção não envolvida pelos anéis de curto-circuito.

Este é um resultado interessante pois pode explicar os fenômenos ocorridos nos estatores tipo **P** (vide figura 3.10) onde foi inserido papel entre as lâminas na tentativa de isolá-las. Algumas dessas isolações não funcionaram bem, formando ilhas de lâminas com contato entre si devido às rebarbas, onde provavelmente correntes induzidas continuariam a fluir. Nestes estatores, esperava-se uma perda magnética menor, pois a intenção de

inserir o papel era de diminuir a perda magnética dinâmica. Porém as medidas mostraram o contrário apresentando uma perda magnética maior.

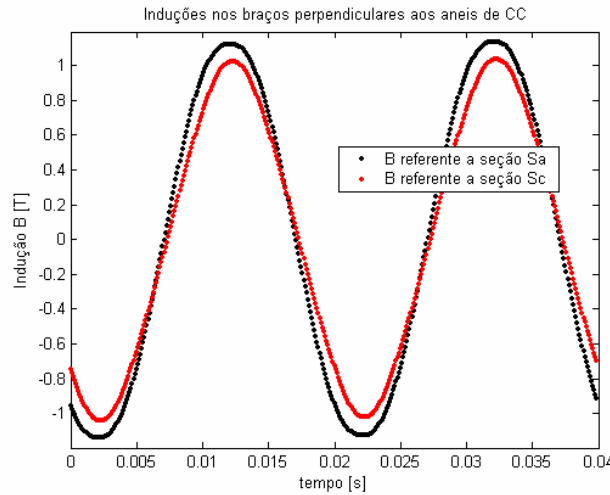


Fig. 6.13 – Induções medidas no braço perpendicular aquele com os anéis de CC.

Foi simulado um caso onde o valor de ℓ_d é considerado de 40cm, ou seja, duas vezes maior que o utilizado nas simulações das Fig. 6.11 e Fig. 6.12. As Fig. 6.14 e Fig. 6.15 mostram as curvas simuladas, as quais são próximas às curvas experimentais. Talvez o valor de ℓ_d de 40 cm esteja mais próximo à realidade, pois de acordo com a medição apresentada na Fig. 6.13, onde verificou-se que, no outro braço perpendicular ao do curto-circuito, o fluxo ainda não está com uma distribuição homogênea.

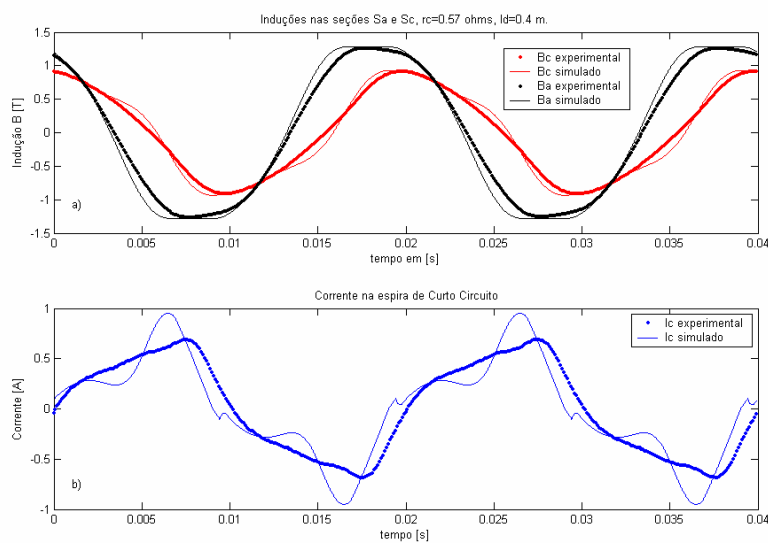


Fig. 6.14 – Induções e correntes experimentais e simuladas com $\ell_d = 40\text{cm}$

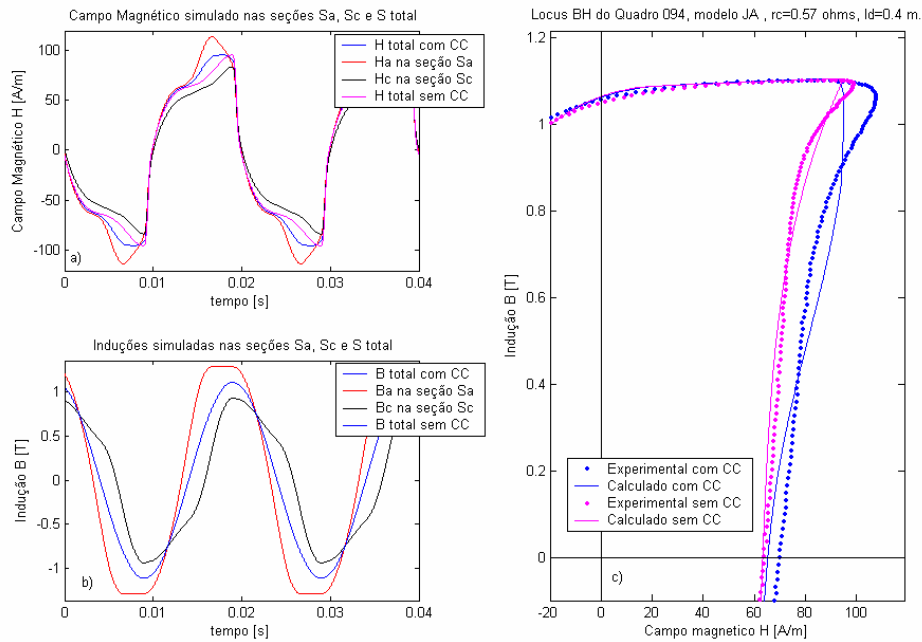


Fig. 6.15 – Valores medidos e simulados no quadro 094 com $\ell_d = 0.4\text{m}$

6.6 Considerações finais

Neste capítulo apresentou-se uma modelagem de um circuito magnético em forma de quadro passível de serem inseridos anéis de curto-circuito. Através de sensores foi possível mensurar algumas das grandezas envolvidas. A modelagem do dispositivo teve o intuito de evidenciar e comprovar o comportamento eletromagnético dos efeitos da presença de anéis de curto-circuito. Escolheu-se a utilização de anéis devido à facilidade em acondicionar o sistema no estudo de possíveis fatores que afetam o desempenho e eficiência de um circuito magnético com núcleo laminado e rebarbas, ou outros aspectos construtivos tais como parafusos de fixação, soldagens em arestas do núcleo, falhas na isolamento interlaminar e micro-soldagem entre lâminas.

Os resultados com o modelo foram satisfatórios, próximos aos obtidos experimentalmente. Poder-se-ia melhorar os resultados de simulação com uma modelagem mais aprimorada do material magnético, bem como, talvez, utilizando núcleos na forma toroidal para a parte experimental. Também se constatou que o modelo do dispositivo de testes, além da modelagem eletromagnética dos materiais, é sensível aos valores do caminho magnético médio na região dos anéis de curto-circuito e do valor da resistência elétrica dos anéis. Não foi explorado exhaustivamente e nem apresentado neste

texto a influência da resistência elétrica dos anéis, pois se tomou com o correto o valor obtido através da medição por um multímetro de precisão. Foram realizadas algumas simulações variando-se alguns por cento o valor utilizado para a resistência. Os resultados foram afetados consideravelmente.

No geral, os resultados experimentais e de simulação comprovam que a existência de caminhos alternativos para correntes induzidas pode ser detectada através da análise do laço BH em uma comparação com um mesmo dispositivo que não contenha tais defeitos.

Sabe-se que quando há a influência apenas de perdas ativas em um circuito magnético o valor do campo H_c será modificado, aumentando conforme a perda magnética cresce. Através da análise feita neste capítulo, comprovou-se que as correntes induzidas em anéis de curto-circuito tendem a afetar a curva BH quando o valor da indução B está se aproximando do ser valor máximo (ou mínimo) de operação. Também se constatou que este efeito pode ser pronunciado devido às características do circuito eletromagnético envolvido ou praticamente imperceptível.

7 Conclusão

As perdas magnéticas nos núcleos das máquinas elétricas são produzidas por vários fenômenos. Uma das componentes das perdas magnéticas, a perda por histerese, é causada pelo próprio processo de magnetização em si do material, a qual é função da natureza do material e de sua história sob o ponto de vista magnético. Ela independe da velocidade de como o material se magnetiza. As demais são associadas às perdas magnéticas dinâmicas provenientes de vários fenômenos, alguns em relação à própria natureza do material (perdas por correntes de Foucault no interior da lâmina e perdas excedentes) e outros às características eletromagnéticas de um núcleo em específico. As perdas magnéticas interlaminares estão incluídas no conjunto daquelas dependentes da frequência de operação e das características do pacote montado. Elas são provenientes da existência de condutividade elétrica do isolante da lâmina em si, de falhas locais neste isolante, dos efeitos dos parafusos de fixação do pacote, de rebarbas, e do que mais possa proporcionar caminhos para surgimento de correntes induzidas no pacote montado.

Nesta dissertação, objetivou-se estudar, identificar, separar e analisar os possíveis fatores e fenômenos causadores das perdas interlaminares. Em um núcleo magnético montado, os possíveis tipos de perdas magnéticas ocorrem e se manifestam simultaneamente, tornando difícil a identificação e a separação das consequências de cada uma em relação às perdas interlaminares. Além disso, a contribuição de cada aspecto construtivo do pacote causador da perda interlaminar e os outros relativos somente a ela própria (qualidade do isolante, por exemplo) interagem entre si e são medidos concomitantes em um núcleo montado. Necessitou-se então estudar processos e fenômenos alheios à natureza da perda interlaminar, mas que interferem na medição da mesma.

Um fator crítico na manufatura de um núcleo magnético é o processo de estampagem das lâminas, acarretando uma deterioração na micro-estrutura do material, aumentando as perdas por histerese, afetando o revestimento da lâmina caso este exista, produzindo rebarbas e alterações dimensionais que acarretam em diferentes consequências no desempenho da máquina elétrica. O efeito sobre as propriedades micro-estruturais (perda por histerese) pode ser atenuado pelo tratamento térmico, aliviando as tensões internas adicionadas pelo processo de corte da lâmina. Por outro lado, durante o

tratamento térmico, podem ocorrer contatos sólidos entre as lâminas pelas falhas no revestimento ou na formação do mesmo, as chamadas de micro-soldas (por exemplo, quando um pacote sofreu um processo térmico, geralmente as lâminas ficam presas umas nas outras). Elas proporcionam caminhos para correntes elétricas fluírem entre as lâminas do pacote. Defeitos como estes são difíceis de serem detectados, pois não há uma metodologia desenvolvida para este fim, além de que as contribuições de outros defeitos e/ou fenômenos possam ser da mesma ordem de grandeza ou maiores.

Dentro do projeto FINEP/EMBRACO/GRUCAD em que esta dissertação esteve inserida, realizou-se estudos em vários estatores montados com diferentes tipos de isolações entre lâminas. Constatou-se que a falta de revestimento da lâmina aumenta a perda magnética substancialmente. Na comparação entre os revestimentos C-0, sem revestimento e com a inserção de isolante entre as lâminas, obteve-se um resultado não esperado. Esperava-se reduzir as perdas magnéticas medidas no pacote inserindo-se papel entre as lâminas. Nos resultados obtidos por Beckley quando este inseriu isolantes entre as lâminas em pacotes, a perda magnética medida também aumentou. Este fato conduziu ao desenvolvimento de diretrizes de procedimentos de ensaio com a confecção de um sistema para eliminar (ou atenuar) e isolar efeitos de alguns fatores construtivos, tais como o revestimento das lâminas, a pressão de aperto do pacote, os contatos entre lâminas ocasionados por parafusos, e caminhos alternativos para correntes induzidas criados por rebarbas. Assim, puderam-se realizar estudos comparativos com e sem parafusos de fixação, por exemplo. Desta feita, pode-se propor uma metodologia de separação das perdas interlaminares, a qual consiste em realizar medidas com pacotes com e sem a inserção de isolante entre as lâminas, permitindo verificar o efeito da isolação das lâminas, por exemplo. A diferença entre valores medidos corresponde às perdas interlaminares provenientes de correntes induzidas fluindo através da isolação entre uma lâmina e outra. O mesmo procedimento foi realizado verificando o efeito dos parafusos nas perdas interlaminares. Como contribuição relevante da pesquisa desenvolvida, propôs-se que os fenômenos causadores das perdas interlaminares fossem analisados na curva BH do pacote, no valor do campo máximo $H_{\text{máx}}$ e no valor do campo coercitivo H_c , além do valor da perda magnética como tradicionalmente é feito.

Os ensaios realizados mostraram que a falta de revestimento aumenta as perdas magnéticas alargando o laço BH na região do campo coercitivo H_c . O efeito dos parafusos,

além de acrescer a perda magnética, também aumenta o valor do campo magnético máximo. Um outro fator de influência significativa na perda interlaminar é a pressão de aperto do pacote. Aumentando-se a pressão, incrementam-se tanto as perdas magnéticas por histerese (devido à deformação do material) quanto às perdas dinâmicas (por melhorar o contato entre lâminas), afetando principalmente o valor de campo magnético máximo. Os efeitos da pressão na perda por histerese são separados automaticamente dos efeitos das perdas interlaminares aplicando a metodologia proposta com medições com e sem isolante. Os efeitos da pressão na perda por histerese são determinados através da medição apenas acrescentando isolante entre lâminas, já que se pressupõe que as perdas por correntes induzidas clássicas no interior da lâmina são independentes da pressão. Porém, as perdas excedentes podem sofrer influência da pressão, algo que pode ser motivo para novos trabalhos de pesquisa.

Levando em conta apenas os aspectos que contribuem para o aumento das perdas interlaminares por efeito Joule das correntes induzidas, pode-se modelar a perda interlaminar de maneira semelhante ao cálculo clássico das perdas por correntes de Foucault dentro da própria lâmina. Assim, as perdas interlaminares são função quadrática tanto da indução máxima como da frequência de operação. Através das curvas de tendência da evolução das perdas interlaminares em função da indução máxima (com frequência de operação fixa) ou da frequência (com a indução magnética de operação fixa) verificou-se que os modelos matemáticos para este tipo de perda tendem a ter os seus expoentes com valores próximos ao número “2”. Acredita-se que a variação obtida em torno deste valor foi devido a problemas práticos de ensaio e medição. A medição da pressão foi realizada de maneira indireta, por meio de um torquímetro. Percebeu-se que após a medição de um conjunto de pontos de operação em um ensaio, a pressão no torquímetro não era a mesma que foi estabelecida no início. A temperatura foi outro fator que não foi levado em consideração de maneira rigorosa. Percebeu-se que fazendo muitas medidas de pontos em um único ensaio, o pacote sofria uma elevação de temperatura. A fim de atenuar este fato, realizou-se cada conjunto com poucos pontos medidos. Sabe-se também que o manuseio das lâminas interfere em suas características magnética, além da memória magnética que ocorre com a variação da pressão entre um ensaio e outro.

Um dos fenômenos difíceis de serem estudados e detectados são os efeitos dos caminhos alternativos de correntes induzidas no interior de um pacote provocado por

rebarbas, micro-soldas, parafusos de fixação, soldagem ou grampos no pacote. Estes são fenômenos aleatórios e de difícil representação. Inclusive, não se conhece um estudo propriamente dito sobre este tema na literatura. Devido à dificuldade da abordagem experimental, desenvolveu-se uma modelagem matemática para dispositivos eletromagnéticos contendo particularidades que tentam reproduzir os fenômenos provocados pelas correntes induzidas em caminhos alternativos. Em um circuito magnético em forma de quadro foram acrescentadas espiras de curto-circuito a fim de provocar fenômenos semelhantes aos caminhos alternativos de corrente no pacote devido a parafusos, falhas de isolamento e rebarbas. Estes fatores construtivos proporcionam em conjunto, de uma forma ou de outra, segmentos ou até mesmo um caminho elétrico fechado. Correntes induzidas circulando nestes caminhos alternativos criam um fluxo magnético contrário ao fluxo imposto pela força magneto-motriz, provocando uma distribuição instantânea local não homogênea. Assim, há regiões que possuem uma indução máxima superior à média dos valores máximos do circuito magnético, elevando a dissipação de energia perdida nestes lugares do circuito magnético, além de exigir uma força magneto-motriz do dispositivo superior em relação ao caso em que não houvesse a existência desses caminhos. Portanto, além do núcleo dissipar uma energia magnética maior, exigirá uma corrente elétrica superior, provocando perdas adicionais nos enrolamentos. Percebeu-se experimentalmente e por meio de simulação que anéis de curto-circuito fazem com que o laço BH se modifique principalmente em uma região específica, ou seja, quando a indução está se aproximando do seu valor máximo (ou mínimo) de operação. Alguns detalhes nos resultados de simulação não apareceram como na prática. Julga-se que isto seja devido aos tipos de modelos utilizados para o material. Entretanto, para o propósito de verificar que correntes induzidas por caminhos alternativos modificam o laço BH, a qual é onde os efeitos são mais evidentes do que uma análise apenas pelo valor da perda magnética ou através dos valores dos campos magnético máximo e coercitivo, os resultados da simulação numérica foram próximos aos experimentais. Provavelmente, utilizando no programa de simulação modelos dos materiais de maneira mais precisa e realizando ainda uma separação das perdas magnéticas, os resultados serão mais próximos aos obtidos experimentalmente. Esta poderia constituir uma próxima etapa de aprofundamento da pesquisa, a qual exigirá bons modelos para o material magnético e uma parte experimental cuidadosamente preparada

para este fim. Ademais, o GRUCAD possui ferramentas desenvolvidas que podem conduzir este estudo de maneira consistente e promissora.

As medições e as análises realizadas em estatores montados com lâminas estampadas no início, meio e fim da vida útil da ferramenta de corte mostraram que o desempenho magnético dos estatores é semelhante, não evidenciando um aumento sensível da perda magnética. Sabe-se que o tempo da vida útil da ferramenta afeta o desempenho de uma máquina em si, provavelmente devido à variação dimensional do entreferro e possivelmente da deterioração magnética da região dos dentes. Nos ensaios realizados neste trabalho, a contribuição de fenômenos existentes na região dos dentes é menor do que a da coroa, pois o fluxo imposto pela bancada de testes se estabelece na coroa do estator, como se este fosse um toróide de mesma largura da coroa. Talvez, com um sistema que forçasse a passagem do fluxo pelos dentes, outros resultados experimentais importantes para a confecção de máquinas poderiam ser obtidos. Isto significa que as conclusões obtidas neste trabalho com respeito à vida útil da ferramenta de corte são parciais, e devem ser interpretadas na limitação dos ensaios realizados.

Esta dissertação foi o primeiro estudo propriamente dito das perdas magnéticas interlaminares em máquinas elétricas realizado no GRUCAD. Não foi conclusivo, e nem teve esta pretensão. Devido à aleatoriedade dos fenômenos, a modelagem do sistema é complexa. A abordagem experimental exige procedimentos rigorosamente controlados, pois sempre ao montar e manusear o circuito magnético ele agrega características distintas das anteriores, além da variação típica que ocorre ao longo tempo. Porém, com a postura científica assumida na abordagem do assunto, acredita-se que as contribuições deste trabalho são relevantes e que abrem horizontes para a sua continuidade. As sugestões de aplicação dos conhecimentos adquiridos neste trabalho, de melhoria dos procedimentos experimentais e da análise, e para futuros trabalhos, são enumeradas a seguir.

- i) Melhoria do método de determinação das perdas interlaminares utilizando um método de controle da pressão no pacote com medição direta e instantânea. Percebeu-se que neste trabalho, nos resultados experimentais obtidos, a variação e precisão da medição da pressão possa ser uma das maiores causas da não conformidade com o que se esperava.

- ii) Estudar as perdas interlaminares em função da variação da largura da lâmina (de maneira semelhante àquela que Coombs realizou) e em função da temperatura do pacote.
- iii) Desenvolver um protótipo com núcleo em forma de toróide para estudar os efeitos dos anéis de curto-circuito utilizando modelos provenientes do processo de separação das perdas magnéticas do próprio material. Poder-se-ia realizar também estudos desta natureza em função de possíveis espessuras de isolantes (e/ou de revestimentos), da pressão do pacote, e da temperatura.
- iv) Estudo das perdas interlaminares nas regiões dos dentes de estatores de motores. Para tanto, uma bancada de ensaio deveria ser desenvolvida com uma metodologia de abordagem da questão.
- v) Estudo de vários tipos de revestimentos, incluindo tempo de envelhecimento. Neste trabalho, devido às amostras disponíveis, trabalhou-se apenas com o revestimento C-0, laminas lixadas, e com a inserção de isolantes.
- vi) Um trabalho de pesquisa inédita sugerida consiste em estudar, averiguar, e determinar se possível, se a pressão de um pacote (e a temperatura) afetam as chamadas perdas excedentes. Conforme o modelo consagrado na literatura por Bertotti [12, 13], sob o ponto de vista do material, as perdas excedentes são função da condutividade elétrica do material (a qual acredita-se que seja constante com a pressão), de um coeficiente de atrito próprio ao processo de magnetização, e de um campo coercitivo equivalente obtido de uma abordagem estatística da ativação de entes representativos do processo de magnetização. Estes dois últimos parâmetros podem ser função das características micro-estruturais do material. Além disso, sabe-se que a perda por histerese e a permeabilidade magnética são definidas pelas características da micro-estrutura do material. Ora, se a pressão mecânica atua na parte magnética relativa a deformações e tensões na micro-estrutura, e já que a perda excedente é função da micro-estrutura do material, talvez as perdas excedentes também sejam afetadas pela pressão.

Acredita-se que este trabalho de pesquisa esteja contribuindo eficazmente na abertura de novas frentes e temas de pesquisa, bem como de sua própria continuidade.

Anexo A

A.1 Equipamentos utilizados

As medições realizadas na presente dissertação foram realizadas por bancadas especiais, próprias para caracterizar materiais magnéticos, ou seja, medir sua permeabilidade, perda magnética, e outros parâmetros associados. A realização do ensaio de caracterização magnética conforme as normas [6] tem como requisito fundamental que a forma de onda do fluxo magnético na amostra seja senoidal. Para garantir esta condição, utiliza-se uma espécie de transformador com núcleo móvel, onde o material a ser ensaiado é inserido, conforme será descrito adiante. Assim, aplica-se no enrolamento primário uma forma de onda de tensão adequada para que a tensão induzida no enrolamento secundário seja senoidal, ou seja, é realizado um controle de maneira a manter a tensão do secundário na forma senoidal. O fator de forma da tensão no secundário deve ser de 1.11 com variações permitidas de $\pm 1\%$, segundo a norma NBR 5161. O fator de forma é a relação entre o valor eficaz (rms) da senóide e seu valor médio (retificado). Para a realização das medidas experimentais apresentadas nesta dissertação foram utilizadas duas bancadas de caracterização de matérias:

- a) Bancada de caracterização MPG100D, da Brockhaus Messtechnik [29];
- b) Bancada de caracterização de materiais desenvolvida pelo GRUCAD [27].

Ambas bancadas de caracterizações seguem os padrões necessários para ensaios desta natureza. Existem diferenças intrínsecas em cada uma, que justificam a necessidade de utilizar ora uma das bancadas, ora a outra, os quais serão vistos a seguir.

A.2 Bancada MPG100D Brockhaus

A bancada MPG 100 D da Brockhaus Messtechnik foi adquirida pelo Laboratório de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos – GRUCAD (adquirida através de um projeto em parceria com a FINEP e a Empresa Embraco SA – Empresa Brasileira de Compressores), a qual realiza as medições de perdas magnéticas, permeabilidade e curva de magnetização inicial, além de fornecer todos parâmetros realizados na medida em arquivo Excel, facilitando a análise dos resultados. Por ser um sistema totalmente

integrado, as medições realizadas são rápidas. A bancada permite a inserção das amostras em três diferentes equipamentos:

1. **Quadro de Epstein**, conforme a Norma NBR 5161 [4], onde as lâminas são condicionadas em quatro braços, formando um circuito magnético fechado. Um mínimo de 12 lâminas é necessário para realizar as medidas com exatidão, sendo 50% delas cortadas na direção Longitudinal (mesma direção de laminação) e as outras 50% delas cortadas na direção Transversal, para material de grão não-orientado. As dimensões das lâminas são 30mm x 280 mm. Elas são inseridas de forma que as lâminas Transversais ficam em braços paralelos e, conseqüentemente, o mesmo acontecerá com as amostras Longitudinais. A Fig. A.1 mostra o quadro de Epstein padrão 25cm, com caminho magnético médio l_m padronizado de 0,94m. Possui uma bobina de compensação do fluxo disperso, para garantir a exatidão das medidas.
2. **Single Sheet Tester (SST)**, conforme a Norma IEC 404-3 [7], onde as lâminas são testadas uma a uma, sendo um método mais prático e rápido que o Epstein. Neste equipamento, apenas uma lâmina de 30mm x 280 mm é inserida, e o circuito magnético é fechado pelo próprio SST, o qual possui um núcleo interno para isso, conforme Fig. A.2. Neste caso, medir a massa da lâmina com precisão torna-se fundamental, pois como se deve ter uma precisão de 0,25% [4], uma lâmina de aproximadamente 30g deve ser medida com precisão de 0,075g. Este equipamento permite medir a anisotropia do material, conforme pode ser visto no artigo [5]. Também possui uma bobina de compensação do fluxo disperso.
3. **Ring Core**, o qual é um teste não normalizado, adequado para análises qualitativas de estatores montados ou de pacotes de lâminas toroidais formando o núcleo magnético, os quais podem ser facilmente testados, bastando para isso passar o cabo de excitação e medição no interior do núcleo, como mostra a Fig. A.3 para um estator. Este foi o equipamento utilizado para a realização dos ensaios dos estatores referentes a esta dissertação. Este método de medida não possui bobina de compensação do fluxo disperso diminuindo a exatidão principalmente nas induções mais altas. Como o objetivo dos testes em estatores não são a avaliação específica de cada um mas sim a comparação entre amostras, possíveis desvios de medição

estão presentes nos conjuntos dos ensaios, não podendo ser então encarado como um erro sistemático que interferirá nas análises das comparações.



Fig. A.1 – Quadro de Epstein padrão 25cm.



Fig. A.2 – Equipamento de medida SST – *Single Strip Tester*



Fig. A.3 – “Ring Core Tester” – Teste de toróides

Como resultado da medição, o equipamento apresenta a perda total P_s no ferro (a unidade da perda magnética total P_s é dada em W/kg) a qual é separada automaticamente pelo equipamento em dois tipos, a saber:

a) Perdas por Histerese – P_h [W/kg]: determinada através da extrapolação da curva das perdas totais para uma frequência nula.

b) Perdas Dinâmicas – P_w [W/kg]: determinada pela diferença da perda total pela perda por histerese, na curva de perdas em função da frequência,

Para o equipamento realizar tal separação, devem-se realizar medidas em diferentes frequências com as respectivas induções constantes. A separação através do método de extrapolação possui alguns aspectos não desejáveis, como descritas no capítulo 1 sobre a separação das perdas. É importante ressaltar que a frequência mínima de ensaio deste

equipamento é 5 Hz, sendo que em alguns casos este ponto de operação não pode ser alcançado devido a limitações da máquina. Como este equipamento não realiza medidas da perda por Histerese (frequência de 1Hz), foi necessário utilizar a bancada de caracterização de materiais desenvolvida pelo GRUCAD [27].

A.3 Bancada de caracterização desenvolvida pelo GRUCAD

A bancada de caracterização de materiais magnéticos foi desenvolvida no GRUCAD por ocasião do desenvolvimento da tese de doutorado de N. J. Batistela [27]. É um equipamento versátil e robusto, com possibilidade de realizar medidas em frequências baixas (1 Hz por exemplo). Utiliza como equipamento principal o quadro de Epstein da marca Yokogawa, porém, pode ser conectado qualquer tipo de toróide com enrolamentos primário e secundário. Como pode ser visto na Fig. A.4, a bancada possui um computador para geração dos sinais de controle e também para o tratamento dos sinais adquiridos no quadro através de um osciloscópio e um amplificador de corrente. Uma fonte CC especial fornece a energia para uma ponte inversora gerar a tensão no enrolamento primário, e o controle do formato senoidal da tensão do secundário é realizado automaticamente. A aquisição dos sinais é realizada manualmente com o auxílio do osciloscópio, e estes são tratados via software baseados no ambiente LabView da National Instruments. Este processo torna a caracterização do material mais demorada que a bancada Brockhaus. Porém ela possui versatilidades adicionais, como por exemplo, a realização de medidas com forma de onda do tipo PWM.



Fig. A.4 – Bancada de caracterização de materiais magnéticos desenvolvida no GRUCAD

Para o desenvolvimento deste trabalho de mestrado, foi construído um sistema de conectores para facilitar a medição em estatores. Ele permite o acoplamento rápido de qualquer estator à esta bancada, simplesmente enrolando o cabo amarelo ao redor do estator, como mostra a Fig. A.5. Na mesma figura pode-se verificar o suporte que substitui os parafusos de fixação do estator e mantém as lâminas alinhadas e pressionadas. Este suporte foi utilizado para a separação das perdas interlaminares nos ensaios realizados na bancada Brockhaus, pois permite controlar a pressão nas lâminas apertando os parafusos do suporte com o auxílio de um torquímetro.

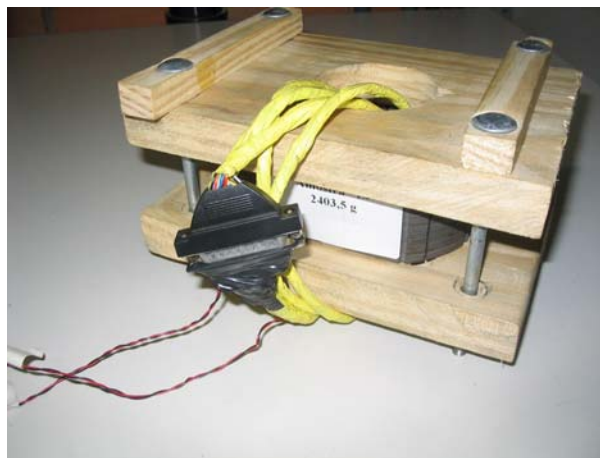


Fig. A.5– Conjunto de cabos e suporte para realização das medidas no estator.

A.4 Análise da bobina de compensação do fluxo disperso do quadro de Epstein

O quadro de Epstein é formado por dois enrolamentos de 700 espiras cada (primário e secundário) os quais são utilizados para impor o campo magnético no material e para medir o valor da indução magnética no mesmo, respectivamente. Estes enrolamentos estão distribuídos de maneira uniforme ao longo do circuito magnético, sendo que as bobinas primárias e secundárias estão sobrepostas (a bobina primária está sobreposta à secundária). Entretanto, há o aparecimento de uma tensão induzida ocasionada por fluxo disperso. Quando não existe material magnético inserido nos enrolamentos do quadro, a corrente que circula pelo enrolamento primário provoca um fluxo que atravessa as espiras do enrolamento secundário. Este fluxo induz uma tensão indesejada no enrolamento secundário, pois sem material magnético a tensão no enrolamento secundário deve ser nula (o objetivo do quadro é medir as propriedades do material magnético e não do ar). Se não houver uma compensação deste efeito, quando se

adicionam lâminas no quadro, este fenômeno continua a ocorrer para qualquer nível de indução. Os efeitos são mais perceptíveis quando o material satura e sua permeabilidade diminui. A solução adotada é a utilização de uma bobina de compensação para que isso não ocorra e as medidas sempre representem valores próximos às amostras inseridas no quadro. Esta bobina de compensação gera uma tensão induzida contrária, de forma a anular a tensão induzida gerada pelas bobinas principais por meio do fluxo que não passa no interior das lâminas.

Uma medição foi realizada com e sem esta bobina de compensação para verificar quantitativamente seu efeito no quadro de Epstein da marca Yokogawa. A Fig. A.6 apresenta a curva de magnetização inicial de um material medido com e sem a bobina de compensação. Percebe-se que após atingir a saturação, o efeito da bobina torna-se evidente. Caso não haja compensação do fluxo disperso, acrescentam-se incertezas na determinação da perda magnética e da permeabilidade pois no momento da saturação o efeito do fluxo disperso começa a interferir. Veja na Fig. A.7 a curva da perda magnética medida nos dois casos, juntamente com o valor da permeabilidade real do material (medida com e sem a bobina de compensação).

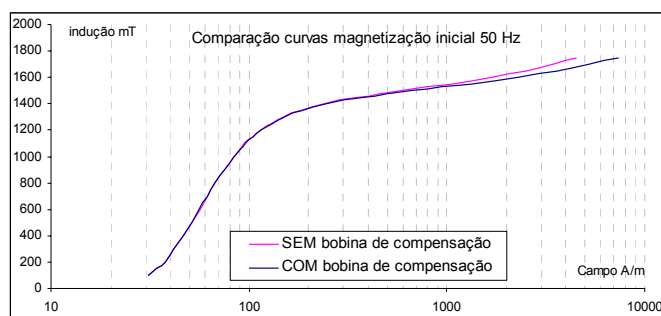


Fig. A.6 – Curva de magnetização inicial medidas no quadro de Epstein com e sem a bobina de compensação à 50 Hz

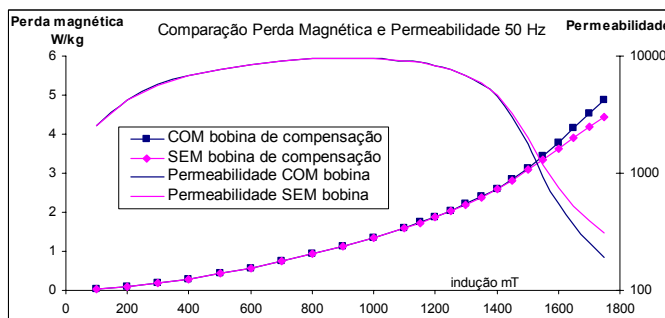


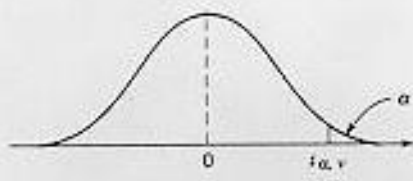
Fig. A.7– Perdas magnéticas medidas com e sem bobina; permeabilidade relativa no segundo eixo.

Anexo B

Tabela dos coeficientes t da distribuição de Student.

No exemplo, foi encontrado o valor de 3,707 para 6 graus de liberdade ($v=6$) e 99% de confiança ($\alpha = 0,005$, distribuição bidirecional).

Tabela de Distribuição t de Student:



$v \backslash \alpha$	0,05	0,025	0,01	0,005
1	6,314	12,706	31,821	63,657
2	2,920	4,303	6,965	9,925
3	2,353	3,182	4,541	5,841
4	2,132	2,776	3,747	4,604
5	2,015	2,571	3,365	4,032
6	1,943	2,447	3,143	3,707
7	1,895	2,365	2,998	3,499
8	1,860	2,306	2,896	3,355
9	1,833	2,262	2,821	3,250
10	1,812	2,228	2,764	3,169
11	1,796	2,201	2,718	3,106
12	1,782	2,179	2,681	3,055
13	1,771	2,160	2,650	3,012
14	1,761	2,145	2,624	2,977
15	1,753	2,131	2,602	2,947
16	1,746	2,120	2,583	2,921
17	1,740	2,110	2,567	2,898
18	1,734	2,101	2,552	2,878
19	1,729	2,093	2,539	2,861
20	1,725	2,086	2,528	2,845

v = graus de liberdade

Referências Bibliográficas

1. Bastos, J. P. A. *Eletromagnetismo e cálculo de campos*. 3º ed Florianópolis: editora da UFSC, 1996.
2. Fiorilo, F.; Novikov, A. Power Losses under Sinusoidal, Trapezoidal and Distorted Induction Waveform. *IEEE Trans. Magn.*, v.26, n. 5, 2559-2561, 1990.
3. Fiorilo, F.; Novikov, A. An Improved Approach to Power Losses in Magnetic Laminations under Nonsinusoidal Induction Waveform. *IEEE Trans. Magn.*, v.26, n. 5, 2904-2910, 1990
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Produtos laminados planos de aço para fins elétricos*, NBR 5161. Rio de Janeiro, 1996
5. Meurer, E. J.; Garcia, J. S. D.; Batistela N. J.; Carlson, R.; Sadowski, N.; Kuo-Peng, P.; Bastos, J. P. A. Análise e Comparação de Aparelhos para Medidas de Perdas Magnéticas em Lâminas de Aço ao Silício. In *6º CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, São Paulo, 2004.
6. Mendes, F. B. R. *Análise de Medidas de Perdas Magnéticas em Lâminas de aço ao silício*, Florianópolis, 2003. Dissertação de mestrado em eng. Elétrica – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
7. IEC – International Electrotechnical Commission. *Magnetic materials - Part 3: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetic sheet and strip by means of a single sheet tester*, IEC 404-3. 2002-2.1
8. IEC – International Electrotechnical Commission. *Magnetic materials - Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials*, IEC 404-4. 2000-2.1.
9. Amar, M. Protat, F. A Simple Method for the Estimation of Power Losses in Silicon Iron Sheets under Alternating Pulse Voltage Excitation. *IEE Transactions on Magnetics*. V. 30 n. 2. 942 - 944, 1994
10. Cullity, B. D. *Introduction to Magnetic Materials*. USA: Addison-Wesley Publishing Company, 1972.
11. Pry, R. H.; Bean, C. P. Calculation of the Energy Loss in Magnetic Sheet Materials Using a Domain Model. *J. Appl. Phys.* V. 29, n. 3, 1958.

12. Bertotti, G. Physical Interpretation of Eddy Current Losses in Ferromagnetic Materials. I. Theoretical considerations. *J. Appl. Phys.*, v. 57, n. 6, 1985.
13. Bertotti, G. General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials. *IEEE Trans. Magn.* V 24, n. 1, 1988.
14. Mendes, F. B. R.; Batistela, N. J.; Kuo-Peng, P.; Sadowski, N.; Bastos, J. P. A. A Strategy for Iron Losses Separation In: *PIERS 2004*, 2004, Pisa, 2004.
15. Aços carbono e aços silício para fins elétricos. Curso organizado pelo Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos. IPT, *São Paulo*, 2001.
16. Coombs, A.; Lindenmo, M.; Snell, D.; Power, D. Review of types, properties, advantages and latest developments in insulating coatings on nonoriented electrical steels. *IEEE Trans. Mag.* v.37, 2001
17. Boglietti, A.; Cavagnino, A.; Lazzari, M.; Pastorelli, M. Effects of Punch Process on The Magnetic and Energetic Properties of Soft Magnetic Material. In *Electric Machines and Drives Conference, 2001*. IEMDC 2001. IEEE International, 2001 Pages:396 – 399
18. Nakamura, M.; Sugiyama, T.; Kitayama, M. Magnetic and Insulating Properties of Electrical Steel with a New Insulating Coating. *Ieee Trans. Magn*, v.17 1270-1274, 1981.
19. Boglietti, A. A First Approach for the Iron Losses Building Factor Determination. *34° IAS ANNUAL MEETING. CONFERENCE RECORD OF THE 1999 IEEE*, Volume: 1, 3-7 Oct. 1999. Pages:489 - 493 vol.1
20. Smith, A. C.; Edey, K. Influence of manufacturing process on iron losses. In *ELECTRICAL MACHINES AND DRIVES*, 1995. *Seventh International Conference on (Conf. Publ. No. 412)*, 11-13 Sep 1995 Pages:77 - 81, 1995.
21. Marion-Péra, M. C.; Kedous-Lebouc, A.; Cornut, B.; Brissonneau. P. Analysis and comparison of magnetic sheet insulation tests, *JMMM*, vol 133, pp396-398, 1994.
22. Marion-Péra, M. C. ; Waeckerlé, T. Electrical and Physical Characterization of SiFe Sheets Insulation, *IEEE Trans. Magn.* V. 30, Nov 1994.
23. Beckley, P.; Layland, N.J.; Hopper, E.; Power, D. Impact of surface coating insulation on small motor performance. *IEE Proc. Elect. Power Appl.* v.145, 1998
24. Beckley, Philip. *ELECTRICAL STEELS for rotating machines*. IEE Power and Energy Series 37, Ed. Bell & Bain Ltd, Glasgow, 2002

25. Murray R. Spiegel. *Estatística (coleção Schaum McGraw-Hill)*, 2º edição – São Paulo – McGraw-Hill do Brasil, 1985.
26. Landgraf, F. J. G.; Emura, M.; Ito. K.; Carvalho, P. S. G.; Effect of plastic deformation on the magnetic properties of non-oriented electrical steels. *JMMM* 215-216, 2000.
27. Batistela, N. J. *Caracterização e modelagem eletromagnética de lâminas de aço ao silício*. Florianópolis, 2001. Tese de doutorado em eng. Elétrica – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
28. Sadowski, N.; Batistela, N. J.; Bastos, J. P. A. et al. An inverse Jules-Atherton model to take into account hysteresis in time stepping finite element calculations. *IEEE Transactions on Magnetics, USA*, v. 38, n. 2, p. 797-800, 2002
29. Manual de instruções do equipamento de medição MPG-100D da Brockhaus Messtechnik.